

THESIS

MUNICH

1965

**Zusammenstellung
und kritische Betrachtung
der elektronenmikroskopischen
Untersuchungen der Zahnhartsubstanz**

Timm | Litsch

AUS DER KONSERVIERENDEN ABTEILUNG
Vorstand: Prof. Dr. Dr. M. Schug-Kösters
DER KLINIK FÜR ZAHN-, MUND- UND KIEFERKRANKHEITEN
DER UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Direktor: Prof. Dr. Dr. J. Heiss

**Zusammenstellung
und kritische Betrachtung
der elektronenmikroskopischen
Untersuchungen der Zahnhartsubstanz**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde in der Zahnheilkunde
verfaßt und
einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Timm Litsch
aus Stuttgart

München 1965

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter:	Priv.-Doz. Dr. Dr. W. KETTERL
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. Dr. M. SCHUG-KÖSTERS
Dekan:	Prof. Dr. O. HUG

Tag der mündlichen Prüfung: 13.4.1965

INHALTSVERZEICHNIS

- I. A. EINLEITUNG
 - B. Problemstellung

- II. DAS PRINZIP DES ELEKTRONENMIKROSKOPS

- III. PRÄPARATIONSTECHNIK ZUR DARSTELLUNG DER ZAHNHARTSUBSTANZ IM ELEKTRONENMIKROSKOP

- IV. DER SUBLICHTMIKKOSKOPISCHE AUFBAU DER ZAHNHARTSUBSTANZ
 - A. Schmelz
 - B. Dentin

- V. LITERATURÜBERSICHT
 - A. Schmelz
 - B. Dentin

- VI. DISKUSSION

- VII. ZUSAMMENFASSUNG

- VIII. LITERATURVERZEICHNIS

- IX. LEBENS LAUF



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA40154008_0141

I. EINLEITUNG

Mit dem Elektronenmikroskop steht der medizinischen Forschung ein Gerät zur Verfügung, dass die unmittelbare Sichtbarmachung selbst von Makromolekülen erlaubt. Dies ist möglich durch das grosse Auflösungsvermögen (10 Å) und die damit verbundene Originalvergrößerung bis über das Zweihunderttausendfache. Nach den anfänglichen Erfolgen in den verschiedensten naturwissenschaftlichen Fachrichtungen, wurde dieses Mikroskop auch zur zahnmedizinischen Forschung herangezogen. Seit nun etwas über 20 Jahren wird die Zahnhartsubstanz von einer Reihe von Wissenschaftlern elektronenmikroskopisch untersucht. Das Interesse konzentriert sich deshalb besonders auf die Zahnhartsubstanz, weil man hofft durch die Ergründung der Ultrastruktur von Schmelz und Dentin etwas mehr über die Kariesgenese zu erfahren. Die Möglichkeiten, die das Lichtmikroskop diesbezüglich bietet sind weitgehend erschöpft, bedingt durch das geringe Auflösungsvermögen von maximal "nur" 0,1 μ . Ein Grossteil der Strukturelemente von Schmelz und Dentin liegt weit unterhalb dieses Wertes, wie auf indirekte Weise mit Hilfe von Röntgenbeugung rechnerisch ermittelt werden konnte, schon bevor diese Elemente durch das Elektronenmikroskop erfasst wurden.

Die Veröffentlichungen der Elektronenmikroskopiker über die Ultrastruktur der Zahnhartsubstanz zeigen, dass die Befunde der Autoren an denselben Objekten nicht immer übereinstimmen, ja sogar häufig in grossem Gegensatz zueinander stehen. Dies veranlasst auch heute noch die Lichtmikroskopiker den neuen elektronenmikroskopischen Erkenntnissen skeptisch oder gar ablehnend gegenüber zu stehen.

Aufgabe dieser Arbeit soll es nun sein, die markantesten elektronenmikroskopischen Befunde an der gesunden Zahnhartsubstanz zusammenzutragen, auszuwerten und kritisch zu beurteilen. Gleichzeitig wird das Prinzip des Elektronenmikroskops geschildert sowie die Schwierigkeiten, die anfänglich zu überwinden waren, um brauchbares Untersuchungsgut zu gewinnen.

II. DAS PRINZIP DES ELEKTRONENMIKROSKOPS

Durch die Wellenlänge des Lichtes wird wesentlich ein weiterer Fortschritt des optischen Auflösungsvermögens des Lichtmikroskops begrenzt. Die absolute Grenze der lichtoptischen Auflösung von Objektabständen liegt bei $0,1 \mu$. Sie wurde erreicht durch Anwendung von kurzwelligem Licht ($\lambda = 3\,000 \text{ \AA}$; Tageslicht $\lambda \approx 5\,500 \text{ \AA}$) und Vergrößerung der Apertur. Objekte von kleinerem Ausmass als $0,1 \mu$ werden von den Wellen des Lichtes umflossen und sind daher unsichtbar.

Die Gesetzmässigkeiten der Mikroskopie kommen in folgender Formel zum Ausdruck:

$$d = \frac{\lambda}{n \cdot \sin \alpha} = \frac{\lambda}{A \text{ (Apertur)}}$$

Der kleinste Abstand (d) zweier Punkte, den ein Mikroskop noch abzubilden vermag, ist also abhängig von der Wellenlänge (λ) der benutzten Strahlen, dem Brechungsindex (n) des Mediums und dem benutzten Öffnungswinkel (α) des Objektivs.

1925 wurde der Grundstein für die Sublichtmikroskopie durch DE BROGLIE gelegt. Er fand die Wellennatur bewegter Elektronen. Ihre Wellenlänge ist abhängig von der Höhe der verwendeten Spannung (V). Bei $50\,000 \text{ V}$ beträgt die Wellenlänge z.B. $0,055 \text{ \AA}$. Sie ist also $100\,000$ mal kleiner als die des sichtbaren Lichtes. Trotzdem wird heute "nur" ein Auflösungsvermögen von $10 \text{ \AA}^x$ erreicht. Dies ist weniger, als nach obiger Formel auf Grund der viel kürzeren Wellenlänge erwartet werden könnte. Die Ursache liegt darin, dass im Vergleich zum Lichtmikroskop eine viel kleinere Apertur zur Vermeidung von Abbildungsfehlern gewählt werden muss.

Die Elektronenstrahlen sind Korpuskularstrahlen, denn sie stammen von geladenen Teilchen und fallen somit nicht in die Reihe der elektromagnetischen Schwingungen wie das eigentliche Licht. Dennoch gehorchen sie aber geometrisch-optischen Gesetzen, die mit den lichtoptischen vergleichbar sind. Das bedeutet, dass sich die Elektronenstrahlen ebenfalls durch den Wechsel des Mediums, in dem sie sich fortpflanzen, wie Lichtstrahlen brechen lassen. Ein solcher Mediumwechsel kann dadurch erreicht werden, dass man die Elektronenstrahlen ein magnetisches oder elektrisches Kraftfeld passieren lässt.

Als Lichtquelle für ein Elektronenmikroskop dient eine Wolframdraht-Glühkathode deren emittierte Elektronen mit grosser Schnelligkeit nach einer gegenübergestellten Anode gezogen werden. Um die Kathode verläuft ein Zylinder (Steuer-

^{x)} $1 \text{ \AA} = 0,1 \mu = 1 \text{ Zehnmillionstel Millimeter}$

hülse), der wie die Kathode auf einer hohen negativen Spannung steht. In ihm werden die Elektronen konzentriert und gerichtet und treten dann durch die Anode in den Strahlengang des Mikroskops ein. Ab hier ist ihre Geschwindigkeit konstant, was unablässig für die Erzielung eines naturgetreuen Bildes ist.

Der Strahlengang muss auf weniger als 1 millionstel Atmosphäre evakuiert werden, denn die sich fortbewegenden Elektronen würden sonst an den Atomen der Luft gestreut werden.

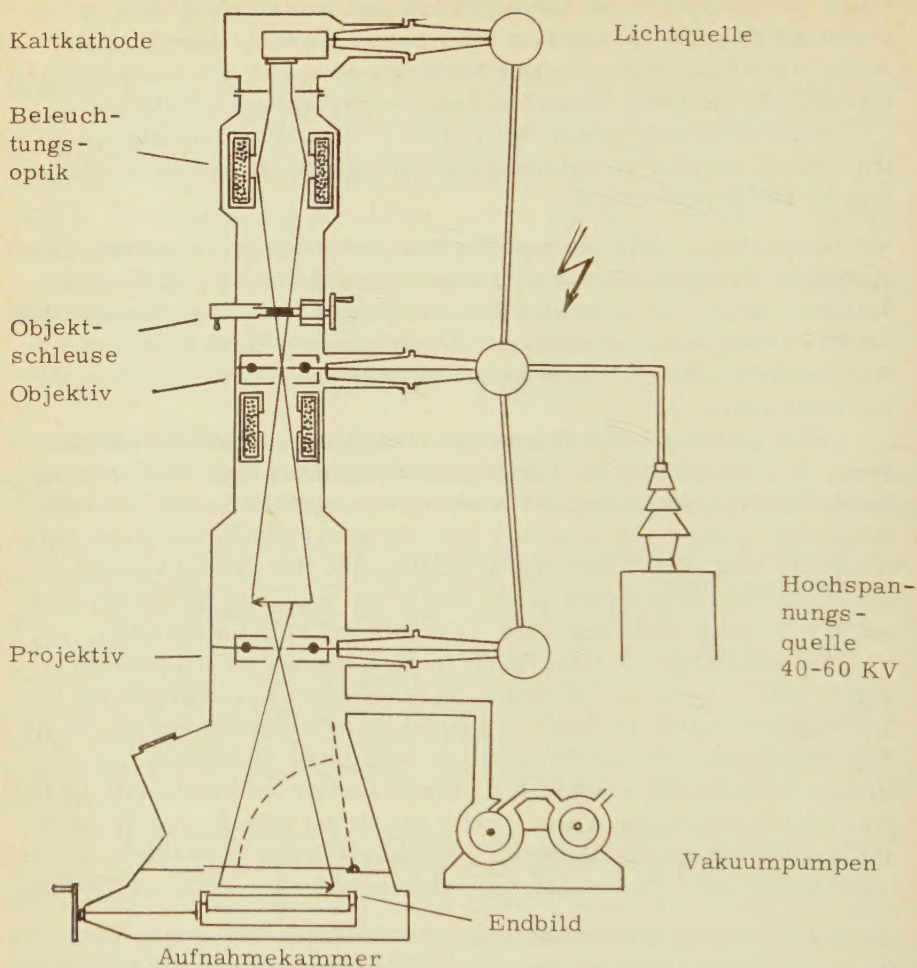
Wie bereits oben erwähnt, dienen beim Elektronenmikroskop magnetische oder elektrische Kraftfelder als "Linsen", denn beide wirken auf die Elektronenladungen im Sinne einer Ablenkung ihrer geradlinigen Bahn. Diese Tatsache führt zur Entwicklung zweier verschiedener "Linsensysteme": Durch BUSCH zu der elektromagnetischen (1927) und durch DAVISSON und CALBICK (1931) zu der elektrostatischen.

Im Prinzip besteht die elektromagnetische Linse aus einer zylindrischen Spule. In dieser befindet sich ein ebenfalls zylindrischer Spalt durch welchen die Kraftlinien in das Vakuum des Strahlenganges austreten können und dabei konzentriert werden. Die Spule wird zum Magneten dadurch, dass Strom durch sie geleitet wird. Durch Änderung der Stromstärke lässt sich bei diesem Linsentyp sein Brennpunkt Abstand kleiner oder grösser gestalten. Mit solchen Linsen ist z.B. das Siemens-Mikroskop von RUSKA und KNOLL ausgestattet.

Die elektrastatische Linse besteht im Wesentlichen aus drei scheibenförmigen, parallel gestellten Elektroden, in denen sich eine zentrale Bohrung befindet zum teilweisen Durchtritt des Kraftfeldes als brechendes Medium für die Elektronenstrahlen. Die mittlere Elektrode wird mit der Glühkathode des Mikroskops kurzgeschlossen, während die beiden äusseren auf Anodenpotential liegen. Die Linsenspannung ist also dieselbe wie die der Elektronenquelle und somit lässt sich bei diesem Linsentyp der Brennpunkt Abstand nicht ändern. Solche Linsen besitzt unter anderem das schweizerische Mikroskop TRÜB und TÄUBER.

Zur Bildregistrierung bedient man sich in der Elektronenmikroskopie, da die Elektronen für das Auge unsichtbar sind, fluoreszierender Stoffe wie z.B. Zinksulfid. Besser noch ist das Schwärzen photographischer Schichten durch die Elektronen.

Das elektronenmikroskopische Bild kommt auf völlig andere Weise als das lichtmikroskopische zustande. Das letztere ist ein Absorptionsbild das erstere aber ein Streuungsbild. Die Elektronen werden nämlich in den Kraftfeldern der Objektatome verstreut und zwar um so stärker je höher die Atomzahl der das Objekt aufbauenden Atome ist. Dies bedeutet, dass die abzubildenden Teilchen von einer bestimmten Dicke ab nicht mehr scharf erscheinen. Aus diesem Grunde muss die Objektdicke auf weniger als $0,1 \mu$ beschränkt werden. Organische



Schweizerisches Elektronenmikroskop TRÜB und TÄUBER mit eingezeichnetem Strahlengang (schematisiert)

Bei diesem dargestellten Typ wird die Schwierigkeit der Scharfstellung elektrostatischer Linsen durch die Kombination mit magnetischen Linsen kompensiert.

Objekte (niedrige Atomzahl!) können mit dem Elektronenmikroskop noch bis zu einer Dicke von 1μ untersucht werden. Allerdings ist hierzu eine besonders hohe Beschleunigungsspannung der Elektronen notwendig. Die Tiefenwirkung der Elektronenstrahlen ist also gering, sie kann aber durch Verwendung hoher Spannung gesteigert werden. Gleichzeitig bedeutet eine solche Steigerung eine Zunahme an Bildschärfe.

Durch die notgedrungene Verwendung einer kleinen Apertur wird mit dem Elektronenmikroskop eine grosse Tiefenschärfe erreicht. So werden von einem elektronenmikroskopisch untersuchtem Objekt sämtliche Schichten in der Dickenausdehnung gleich scharf abgebildet. Diese grosse Tiefenschärfe, die zunächst ein Vorteil zu sein scheint, hat aber auch Nachteile. Da lichtmikroskopisch praktisch nur die Teile des Objekts scharf erscheinen die in einer Ebene liegen, lässt sich ohne weiteres feststellen, was höher und tiefer liegt. Diese Unterscheidung ist bei der elektronenmikroskopischen Abbildung nicht ohne weiteres möglich, da eben alle Teile gleich scharf erscheinen. Man versucht durch Schrägbedampfung der Objekte eine Schattenwirkung und damit einen plastischen Effekt zu erzielen, um diesen Mangel auszugleichen. Die Herstellung von stereoskopischen Bildern wie sie insbesondere von HELMCKE und LENZ auch in der zahnmedizinischen Forschung verwendet wird, vermeidet alle erwähnten Nachteile, so dass die Vorteile der grösseren Tiefenschärfe voll ausgenutzt werden können.

III. PRÄPARATIONSTECHNIKEN ZUR DARSTELLUNG DER ZAHNHARTSUBSTANZ IM ELEKTRONENMIKROSKOP

Die geringe Durchdringungskraft der Elektronenstrahlen verlangt eine Objektdicke von höchstens $0,1$ bis $0,2\mu$. Mit den Methoden, wie sie von der Lichtmikroskopie her bekannt sind, ist dies nicht zu erreichen. So sind für die elektronenmikroskopischen Untersuchungen in der Hauptsache zwei Verfahren entwickelt worden: 1. Die Abdrucktechnik (Replica-Technik) und 2. die Ultradünnschnitttechnik. Neben diesen beiden Verfahren gelangte durch einige Elektronenmikroskopiker aber auch die direkte Untersuchung nach vorausgegangener Isolierung von Kristalliten, Fibrillen und Odontoblastenfortsätzen zur Anwendung. Diese Bestandteile sind so klein und besitzen eine so geringe Dichte, dass ihre Dicke von den Elektronen durchstrahlt werden kann.

Die Abdrucktechnik besteht im Wesentlichen darin, dass zunächst von Zahnschliffen Abdruck genommen wird (mit Celloidin, Zaponlack, Triafol u.a.), um diesen dann mit molekularem Metall zu bedampfen. Die Schliffe können unvorbehandelt, oder poliert, oder angeätzt und auch angedaut sein. Wird die Abdruckmasse von den Schliffen abgezogen, so ist ein originalgetreues Negativ des Objekts erhalten. Auf den Negativabdruck wird im Vakuum z.B. Wolframoxyd molekular unter etwa 45° aufgedampft. Anschliessend wird diese ungleichmässige Schicht durch Bedampfung z.B. mit molekularem Siliziumoxyd unter 40° gleichmässig verstärkt. Auf diese doppelte Metallschicht wird Paraffin aufgetragen, um die Abdruckmasse von dem Metall ohne Verziehung derselben ablosen zu können. Die Metallschicht kann nun über das etwa 70μ weite Loch einer Objektträgerblende gezogen werden. Erst hier wird das Paraffin mit Hilfe von Xylol wieder abgelöst. Die doppelte Metallschicht stellt nun ein sekundäres Positiv des Originalobjekts dar. Der grosse Vorteil der Gewinnung eines solchen Positivs besteht darin, dass bei eventuellen Artefaktbildungen weitere sekundäre Positive vom selben Objekt gewonnen werden können und somit etwaige Fehdeutungen ausgeschlossen werden.

Sinn der schrägen Metallbedampfung ist es, Kontraste auf dem elektronenmikroskopischen Bild zu erhalten. Vor Erhabenheiten des Negativs hauft sich das molekular, schräg aufgedampfte Metall an. Das sekundäre Positiv erhält so in diesem Bereich eine grössere Dicke. Die Durchdringungskraft der Elektronenstrahlen ist hier geringer. Damit wird die Photoplatte entsprechend der Metalldicke geschwärzt und es können so Rückschlüsse auf das Relief des Objekts gezogen werden.

Mit Hilfe von Ultramikrotomen können heute Schnitte von einer Dicke von 200 bis 400 Å angefertigt werden, die direkt elektronenmikroskopischer Untersuchung zugänglich sind. Voraussetzung ist sorgfältigste Entkalkung der Zähne. Die übrigbleibende organische Materie hat nun aber für einen genügenden Kontrastreichtum einen zu geringen Masseunterschied. Durch Verdichtung der Materie kann dieser erhöht werden. Man wählt hierzu die Extraktion bestimmter Bestandteile. In der zahnmedizinischen Forschung wird in der Regel H_2O extrahiert.

Die für das Schneiden unerlässliche Einbettung kann z.B. in einer Mischung aus zwei Teilen Bienenwachs und einem Teil Paraffin oder besser in Methacrylat mit anschliessender Polymerisation erfolgen. Die Fixation wird z.B. von LENZ in OsO_4 vorgenommen.

Von FRANK und HÖHLING wurden mit speziellen Ultramikrotomen Dünnschnitte von der nicht entkalkten Zahnhartsubstanz angefertigt. Sie zeigen aber vorwiegend Trümmerfelder.

Um den Kontrastreichtum zu erhöhen und die Tiefenschärfe des Elektronenmikroskops voll auszunutzen, werden von einigen Autoren von den Objekten Stereo-

aufnahmen angefertigt. Hierzu ist erforderlich, dass das Elektronenmikroskop eine Einrichtung besitzt, die es erlaubt, das Objekt um einen bestimmten Winkelbetrag zu drehen (meist 8°). Das Objekt kann so in zwei verschiedenen Stellungen mit Elektronen angestrahlt werden, so dass von diesem zwei nebeneinanderliegende Bilder auf der photographischen Platte erhalten werden. Der Effekt ist hier derselbe, als wenn das Objekt von zwei verschiedenen Punkten aus aufgenommen würde. Die beiden Bilder werden von dem Augenzentrum, wenn sie durch ein dafür geschaffenes stereoskopisches Gerät betrachtet werden, zu einem einheitlichen, plastischen Bild vereinigt.

Die meisten Elektronenmikroskopiker haben die oben aufgeführten Präparations-techniken in etwas abgewandelter Weise zur Anwendung gebracht. Diese Modifikationen werden in den entsprechenden Abschnitten kurz erwähnt.

IV. DER SUBLICHTMIKROSKOPISCHE AUFBAU DER ZAHNHARTSUBSTANZ

Um den elektronenmikroskopischen Aufbau der Zahnhartsubstanz kurz und zusammenhängend zu schildern, erscheint es mir notwendig mich auf die Forschungsergebnisse von Elektronenmikroskopikern zu stützen, deren Deutungen sich nicht gegenseitig widersprechen.

HELMCKE ist über 20 Jahre elektronenmikroskopisch tätig und gilt als bedeutendster Forscher auf diesem Gebiet. Sein Schüler H. LENZ hat in zahlreichen Arbeiten seine Befunde ergänzt. Ihre Veröffentlichungen (HELMCKE: 18 bis 27; LENZ: 41, 42, 47, 48) sind deshalb geeignet den sublichtmikroskopischen Bau der Zahnhartsubstanz aufzuzeigen.

A. SCHMELZ

Die heute noch gültige Lehrmeinung über den Bau des Schmelzes basiert auf lichtmikroskopischen Ergebnissen verschiedener Autoren wie v. EBNER, v. KORFF, GUSTAFSON, EULER, M. MEYER u. a. (zit. n. HELMCKE 18). Danach werden als eigentliche Elemente des Schmelzes Prismen, interprismatische Substanz (= Kittsubstanz) und Prismenscheide betrachtet. Die Masse der organischen Materie wird hauptsächlich in der interprismatischen Substanz und Prismenscheide,

die der anorganischen in den Prismen konzentriert gesehen. Dabei sollen die Prismen dem Protoplasma der Ameloblasten, die Prismenscheiden den Zellwänden dieser und die interprismatische Substanz der Interzellulärsubstanz entsprechen.

Dass die kleinste morphologische Einheit des Schmelzes nicht das Prisma ist, konnte schon vor der elektronenmikroskopischen Erfassung durch Röntgenbeugungsaufnahmen gezeigt werden.

Durch diese indirekte Methode gelang es auch schon die Grösse der kleinsten Schmelzeinheiten rechnerisch zu ermitteln. Der sichtbare Beweis wurde durch KECK und HELMCKE 1944 mit Hilfe des Elektronenmikroskops erbracht.

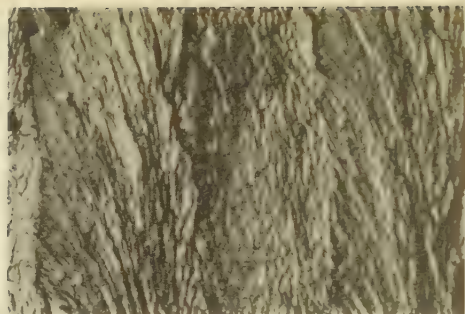
Als geeignetes Verfahren für die Betrachtung des Schmelzes im Elektronenmikroskop wird von HELMCKE und LENZ die Gewinnung von Zahnbruchflächen angesehen. Zähne können entweder mechanisch zerbrochen werden oder mit Hilfe flüssiger Luft, in der sie zerspringen. Von den so gewonnenen Bruchflächen wird Abdruck genommen (z.B. mit Triafol, Zaponlack oder Celloidin), der dann wie üblich weiterbehandelt wird. Diese Methode hat den Vorteil, dass die Bruchlinien häufig entlang den natürlichen Strukturelementen verlaufen. Teilweise kann eine Bruchlinie allerdings auch einmal einzelne Prismen durchsetzen. Durch Verwendung unbehandelter Bruchflächen ist ferner die Gewähr gegeben, dass alle Elemente, die auf ihr zutage treten, in ihrer ungestörten Lagebeziehung zueinander erhalten bleiben. Letzteres kann weder durch einfaches Anschleifen noch durch anschliessende chemische Behandlung (Anätzen oder Andauen), was Präparationsmethoden der meisten Autoren sind, mit Sicherheit erreicht werden. Bei chemischer Nachbehandlung muss nach HELMCKE mit Veränderungen der Struktur gerechnet werden, ebenso können beim Anschleifen, sorgfältigste Politur vorausgesetzt, Schleifspuren das Bild beeinträchtigen. Überdies durchsetzen Anschliffe ein Objekt immer ohne Berücksichtigung der natürlichen Verlaufes der Prismen.

Die letzten Bauelemente des Schmelzes sind Einkristalle (oder Monokristalle genannt) aus Hydroxylapatit ($3 \text{ Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2$) von ca 500 bis 1000 μm Länge und ca 50 bis 100 μm Breite. Ein Prisma ist nun nichts anderes, als ein Verband zahlreicher solcher Einkristalle. Eine konstante Grösse oder ein bestimmtes Verhältnis zwischen Länge und Breite wird von den Einkristallen nicht erreicht, auch fehlt ihnen anscheinend eine charakteristische äussere Begrenzung, die dem hexagonalen Kristallsystem des Hydroxylapatit entsprechen würde. Wie oben bereits erwähnt, hat KECK erstmalig diese Kristallite elektronenmikroskopisch untersucht. Allerdings handelte es sich hierbei um mechanisch isolierte Kristallite, so dass von ihm noch keine Aussage über die Lagebeziehung dieser Elemente gemacht werden konnte. Dies gelang dann HELMCKE mit Hilfe von

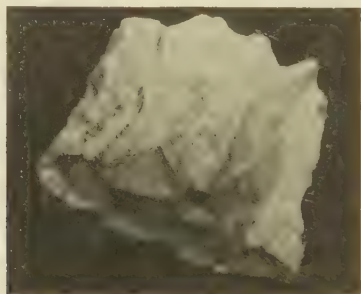
Stereoaufnahmen, welche deutlich werden liessen, dass die Kristallite nicht streng parallel zur Prismenlängsachse gelagert sind sondern von dieser "kometenschweifartig" wegstrahlen. Die Betrachtung einer Bruchfläche, die ein Prisma mit einer idealen Längsachse enthält, ergibt nämlich den Gesamteindruck einer "gefederten Vogelfeder", wobei diese eben das Prisma ist. Der Eindruck wird dadurch hervorgerufen, dass in einem solchen Falle auch die Kristalle mit ihren Längsachsen in der Ebene liegen und die einzelnen Kristallitzüge von der Prismenachse, wie oben erwähnt, abstrahlen. Wenn diese Vorstellung von der Anordnung der Kristallite richtig sein soll, so müsste die elektronenmikroskopische Untersuchung eines Bruches, der ein Prisma am Rande durchsetzt, eine punktierte Fläche ergeben. Das ist auch der Fall, denn die hier radial austretenden Kristallitzüge werden quer getroffen.

Die Bedeutung dieser sublichtmikroskopischen Strukturen sieht HELMCKE vor allem darin, dass hierdurch die verschiedensten Einflüsse auf den Zahn besser kompensiert werden können. Thermische und mechanische Einflüsse müssten nämlich, wenn die Prismen aus einer homogenen, anorganischen Substanz bestünden, zu Sprüngen führen. So aber ist die Substanz schon in kleinste Einheiten aufgeteilt, die überdies derartig angeordnet sind, dass durch sie punktförmige Belastungen der Schmelzoberfläche gleichmässig auf eine Vielzahl von Kristalliten der tieferen und benachbarten Schichten verteilt werden. Daneben gewährt dieses System auch eine gewisse Nachgiebigkeit.

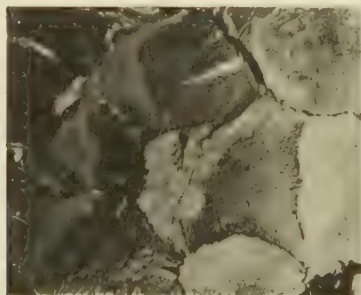
Neben dieser elektronenmikroskopischen Aufgliederung des Prismas, bedingt durch Kristallite, findet sich noch eine weitere. Es handelt sich hierbei um feinste Linien, die das gesamte Prisma durchsetzen und auf elektronenmikroskopischen Aufnahmen stärkerer Vergrößerung (etwa 10 000 : 1) deutlich sichtbar sind. Entsprechend der von HELMCKE angewandten Präparationstechnik handelt es sich hierbei um organische Substanzen, die beim Abheben des Lackabdruckes mit abgerissen werden, oder um Abformung jenes Bettes der schon während des Brechens aus der Unterlage entfernten und am Gegenstück des Bruches haften gebliebenen organischen Bestandteile. Diese organischen Fäden werden von HELMCKE in Anlehnung an die mineralogische Terminologie als "Zwischenklemmungsmasse" bezeichnet. In ihr ist häufig eine deutliche Quergliederung zu erkennen (bei Vergrößerungen um 30 000 : 1), die aber noch nicht Anlass geben darf von retikulär- oder kollagenartigen Fasern zu sprechen. Die Anordnung der Zwischenklemmungsmasse ist eng an die Lage der Kristallite gebunden. Auf Abdrücken bleiben gelegentlich Splitter des Schmelzes haften, bestehend aus einzelnen oder mehreren Kristallen. Hier zeigt sich deutlich, dass die Fäden der Zwischenklemmungsmasse die Kristallite in ihrem Verlauf begleiten. Letztere werden aber nicht vollständig von der Zwischenklemmungsmasse umhüllt, sondern es findet sich jene nur an den Kanten und Zwickeln, also dort, wo sich mehrere Kristallite berühren.



Längsbruch durch Schmelz. Die Schmelzkristallite zeigen eine fiederförmige Orientierung. 12 500 : 1



Modell von Schmelzprismen mit Darstellung der fiederförmig angeordneten Schmelzkristallite.



Querbruch durch Schmelz. Unregelmässige Form der Prismenquerschnitte. 7 200 : 1

Die Begrenzung der Prismen ist nicht geradlinig, wie bisher aus lichtoptischen Untersuchungen angenommen wurde, sondern stark geschlängelt und gezackt. Bedingt ist jene durch das mehr oder weniger starke Vorspringen einzelner Kristallzüge. Auch löst sich im Elektronenmikroskop die lichtoptisch beobachtete hexagonale Querschnittsfigur der Prismen nahezu völlig auf. Nur zufällig wird eine solche erreicht. Für diesen Täuschungseffekt macht HELMCKE die in der Lichtmikroskopie verwandte Präparationstechnik verantwortlich. Es werden ja zur lichtoptischen Untersuchung Dünnschliffe vom Zahn angefertigt, die, wenn sie noch dünn sind, Kristallite in mehreren Schichten übereinanderliegen haben, welche sich dann dahingehend beeinflussen, dass obige Gebilde entstehen. In der Elektronenmikroskopie gelangt dagegen das Abdruckverfahren zur Anwendung, das nur den Umriss der Oberfläche des Objektes zur Abbildung bringt. Deshalb sind Täuschungseffekte durch Überlagerung unmöglich. Der Prismenquerschnitt zeigt im Elektronenmikroskop die verschiedensten Figuren. Er ist manchmal annähernd rund, oder mehr oval, oder noch häufiger mehrzipflig mit Einbuchtungen. Der charakteristische Aufbau durch Kristallite und Zwischenklemmungsmasse bleibt dabei aber von der äusseren Form des Prismas unbeeinflusst. Der unregelmässige Prismenquerschnitt soll so zustande kommen, dass die Auskristallisation eines Prismas hinter der eines benachbarten zurückbleibt, so dass es nur noch den Raum ausfüllen kann, den letzteres ihm liess.

Die Existenz der interprismatischen Substanz und der Prismenscheide (Prismenhülle) wurde durch die elektronenmikroskopischen Aufnahmen nicht bestätigt. Elektronenmikroskopische Untersuchungen von Bruchflächen ergaben, vorausgesetzt sie zeigten zwei oder mehrere Prismen mit idealer Längsachse, dass sich die Kristallite benachbarter Prismen äusserst eng ineinander verzahnen. Eine Prismenscheide, bzw. eine interprismatische Substanz, kann hier, auch wenn sie noch so dünn wäre, nicht dazwischen passen, schon überhaupt nicht aber eine solche, die lichtmikroskopisch sichtbar ist. Nach W. MEYER (52) hat die interprismatische Substanz eine Dicke von 1μ ! Diese müsste im Elektronenmikroskop als breiter Streifen imponieren.

Die Einheit eines Prismas wird nicht durch einen umhüllenden oder chemisch differenzierten Stoff gekennzeichnet, sondern durch die gleichmässige Ausrichtung von vielen Kristallen, wodurch das Bild einer gefiederten Vogelfeder entsteht. Im Bereich der aneinandergrenzenden Prismen sind die Fibrillen nicht enger gelagert als innerhalb derselben zwischen den einzelnen Kristallen. Daraus ist zu schliessen, dass es sich auch hier um Täuschungseffekte, die lichtoptisch bedingt sind, handelt. Die in der chemischen Analyse bestimmte organische Masse des Schmelzes kann also nur durch die fädigen Fibrillenstrukturen, die im Schmelz überall enthalten sind, dargestellt werden.

Im Grenzbereich zwischen Schmelz und Dentin lassen elektronenmikroskopische

Aufnahmen eine Zone erkennen, in der die Anordnung der Hartschubstanz sowohl von der des typischen Schmelzes als auch der des typischen Dentins abweicht. Im Schmelzanteil dieser Zone finden sich unregelmässig angeordnete und eng beieinanderliegende Bauelemente aus Schmelzsubstanz. Die für den Schmelz charakteristischen Prismen werden hier nicht beobachtet. Daraus kann gefolgert werden, dass bei der Bildung dieser Zone nach Ausscheidung der erhärtenden Substanzen durch die Ameloblasten, viele Kristallisationszentren gleichzeitig aufgetreten sind, so dass die dadurch entstandene räumliche Begrenzung die Auskristallisation zu Prismen nicht gestattet. HELMCKE macht Einflüsse von seiten der Odontoblasten hierfür verantwortlich. Erst das Vorhandensein einer derartigen auskristallisierten Schicht und der dadurch bedingte Wegfall der Odontoblastenbeeinflussung gewährleistet das Entstehen des typischen Schmelzbildes.

Der Übergang vom Schmelz zum Dentin kann allmählich oder aber auch sehr plötzlich erfolgen. In beiden Fällen konnte aber von HELMCKE keine Grenzmembran (*membrana limitans*) beobachtet werden, die nach MEYER (52) mit der interprismatischen Substanz verwandt sein soll. Wie die lichtoptischen Untersuchungen so ergaben auch die elektronenmikroskopischen dass die Odontoblastenfortsätze manchmal in den Schmelz hineinragen.

B. DENTIN

Auch zur elektronenmikroskopischen Untersuchung des Dentins wird von den Autoren das Bruchflächenverfahren bevorzugt, denn auch hier zeigt sich der grosse Vorteil desselben, der ja hauptsächlich darin besteht, dass die Bruchlinie häufig dem natürlichen Strukturverlauf folgt. So konnte HELMCKE elektronenmikroskopisch Dentinkanäle über 1,5 mm Länge verfolgen.

Bei der Abdrucknahme von der Dentinbruchfläche kann es vorkommen, dass an der Abdruckmasse (z.B. Zaponlack) Odontoblastenfortsätze, die aus den Dentinkanälen herausgerissen wurden, haften bleiben. Bei der anschliessenden Behandlung des Abdruckes (Vakuumbedampfung mit $\text{WO}_3\text{-SiO}_2$) zur Gewinnung des sekundären Positivs werden die Fortsätze gleichsam in dasselbe eingemauert, so dass sie direkt im Elektronenmikroskop zur Betrachtung gelangen. Folglich ist also häufig eine Aussage darüber nicht möglich, ob die abgebildeten Teile ausschliesslich aus dem Metallrelief bestehen, oder ob an der Metallschicht noch Substanzen des Zahnes haften. Eine Entscheidung hierüber ist nicht unbedingt notwendig, denn das ursprüngliche Gefüge der Bruchfläche bleibt ja erhalten.

Die anorganische Masse des Dentins besteht ebenso wie jene des Schmelzes aus

Hydroxylapatit. Eine ähnliche Auskristallisation, wie es beim Schmelz der Fall ist, kann beim Dentin nicht beobachtet werden. Zwar ist hier der Hydroxylapatit auch kristallin, die Kristalle erreichen aber in der Längsrichtung ungefähr nur ein Drittel der Grösse jener des Schmelzes. In anderer Richtung ist eine Ähnlichkeit zwischen Schmelz- und Dentinkristallen nicht gegeben. Eine besondere Ordnung der Kristalle, wie sie im Schmelz vorliegt, scheint im Dentin nicht vorhanden zu sein. Vielmehr erwecken sie den Eindruck wirr durcheinander zu lagern.

Die amorphe Grundsubstanz des Dentins veranlasste HELMCKE sie mit der Struktur des Betons zu vergleichen. Der Schmelz dagegen sei wie eine Backsteinmauer strukturiert, wobei der Mörtel der organischen Zwischenklemmungs-masse entspricht.

Die Masse der organischen Substanz wird hauptsächlich durch die Zellfortsätze der Odontoblasten (Tomessche Fasern) dargestellt. Die Morphologie dieser Tomesschen Fasern und die der Dentinegrundsubstanz, welche die Fasern unmittelbar umgibt, gehört auch heute noch zu den umstrittensten Fragen der Elektronenmikroskopie der Zahnhartsubstanz.

Die Odontoblastenfortsätze werden von HELMCKE als leere, membranartige Schläuche gedeutet. Sie sollen aus einer keratinähnlichen Substanz bestehen. In vivo müssen sie von Protoplasma, ebenso wie die Odontoblasten angefüllt sein. Durch die Präparation folgt HELMCKE, sei der Inhalt dieser Schläuche verloren gegangen, worauf auch schon SYRRIST hingewiesen hatte. Zur Untersuchung des Dentins, insbesondere der Odontoblastenfortsätze, ist das Abdruckverfahren demnach nicht in gleicher Weise geeignet wie zu der des Schmelzes. In Ermangelung anderer Techniken konnte aber HELMCKE nicht auf diese Art der Präparation verzichten.

Die strittige Frage nach der Existenz einer Neumannschen Scheide, welche die Tomessche Fasern umhüllen soll, wurde dahingehend geklärt, dass eine solche nicht existiert. Wenn Protoplasma und die umhüllende Membran als Tomessche Faser bezeichnet werden, ist eine zusätzliche Hülle im Sinne der Neumannschen Scheide im Elektronenmikroskop nicht zu sehen. Vielmehr liegt der Odontoblastenfortsatz unmittelbar der Wand der Dentinkanälchen an.

Die Kanalwandung zeigt im Elektronenmikroskop feine Rillen, die das Negativ von Fibrillen sein müssen, welche die Odontoblastenfortsätze einzeln umspinnen oder begleiten. Im Gegensatz zu diesen sind die Fibrillen kompakte, kollagenähnliche oder retikulinhähnliche Fäden, welche in ihren Abformungen an der Kanalwandung noch deutlich typische Quergliederung zeigen (bei einer Vergrößerung um 10 000 : 1). Die Gesamtheit der Fibrillen darf aber nicht als Neumannsche Scheide bezeichnet werden, da die einzelnen Gebilde

in viel zu grossem Abstand voneinander den Odontoblastenfortsatz umgeben. Auffallende unterschiedliche Strukturen lassen den Schluss zu, dass es hierbei verschiedenartige Fasern geben muss.

Deutlich können mit dem Abdruckverfahren in Dentinkanälchen abzweigende Seitenäste sichtbar gemacht werden, die von den Odontoblastenfortsätzen entspringen und im rechten Winkel zu diesen quer durch die Grundsubstanz des Dentins verlaufen. Ob die Seitenzweige benachbarter Odontoblastenfortsätze mit einander in Verbindung treten, konnte von HELMCKE nicht geklärt werden. Wohl hatte dieser Seitenäste über eine lange Strecke verfolgt, die Bruchfläche sprang aber immer plötzlich in eine tiefere oder höhere Schicht über und liess so den Seitenast auskeilen (Helmcke Atlas I, Tafel 32 bis 34). Einige Stereoaufnahmen zeigen, dass die Seitenäste quirlförmig am Odontoblastenfortsatz entspringen. Die Seitenäste zeigen ihrerseits wiederum häufig Seitenverzweigungen. Sie können im gesamten Verlauf des Odontoblastenfortsatzes beobachtet werden.

Gelegentlich finden sich geschlossene Hüllen um die Odontoblastenfortsätze und deren Seitenzweige. Sie sind reich an anorganischer Substanz und stellen sich, wenn sie quer getroffen sind, als mantelartige Hohlzylinder dar. Ihre äussere Begrenzung ist zwar plötzlich, aber doch kontinuierlich, das heisst, sie gehen ohne besondere Zwischenschicht in die übrige Grundsubstanz über. Die innere Begrenzung ist mit der Kanalwandung identisch.

Durch lichtmikroskopische Untersuchungen wurde schon darauf aufmerksam gemacht, dass um die Odontoblastenfortsätze herum Hüllen vorhanden sein können, ausgezeichnet gegenüber der normalen Dentine Grundsubstanz durch andere Färbbarkeit und grössere Resistenz gegen chemische Lösungsmittel (W. MEYER 52). Ob aber die lichtmikroskopisch und elektronenmikroskopisch beobachteten Gebilde einander entsprechen, ist noch fraglich. Auffallend ist, dass bei solchen elektronenmikroskopischen Bildern, bei denen sämtliche Odontoblastenfortsätze von anorganischen Hohlzylindern umgeben sind, auch alle Seitenäste Hohlzylinder haben. Andere Bilder, bei denen die Odontoblastenfortsätze keine Zylinder aufweisen, zeigen auch sämtliche Seitenäste keine derartigen Gebilde.

Über die Bedeutung der Odontoblastenfortsätze steht nach HELMCKE nur so viel fest, dass von ihnen diejenige gelartige Masse ausgeschieden wird, aus der sich durch kristalline Umwandlung die harte Grundsubstanz (= interkanalikuläres Dentin) des Dentins bildet. Durch diesen Vorgang stellen die Dentinkanäle nichts anderes dar als reine Aussparungen der Grundsubstanz. Auf das nachträgliche Erhärten deuten auch die Abformungen der die Odontoblastenfortsätze umgebenden Fibrillen in den Kanalwandungen hin. Die Tomesschen Fasern werden also in die Grundsubstanz bzw. Hohlzylinder derart eingemauert, dass kein Spalt zwi-

schen ihnen und der Grundsubstanz bestehen bleibt. Lichtmikroskopisch und elektronenmikroskopisch beobachtete Spalte können nur so gedeutet werden, dass sie nachträglich durch Schrumpfung der Odontoblastenfortsätze entstanden sind, was eben nur durch den vorherigen Verlust des Protoplasmas möglich ist.

Die übrige Grundsubstanz ist von fibrillenähnlichen Elementen organischer Zwischenklemmungsmasse durchsetzt. Derartige organische Massen befinden sich auch in den Hohlzylindern, offenbar aber in wesentlich geringerer Menge als in der Grundsubstanz.

Lichtmikroskopische Untersuchungen haben schon gezeigt, dass auch im bleibenden Zahn zwischen Pulpahöhle und Dentin eine unverkalkte, schmale Zone (Prädentin) liegt. Mit Hilfe von Zaponlackabdrücken gelang es HELMCKE diese auch elektronenmikroskopisch zur Abbildung zu bringen, wobei die Zone des Prädentins als organisches, wabenartiges Gerüst an den Lackabdrücken haften bleibt. Dieses Gerüst beherbergt zahlreiche Höhlen in denen im lebenden Zahn die Odontoblasten vermutet werden müssen. Von jeder der Höhlungen führt ein schlauchartiger Odontoblastenfortsatz in das Dentin hinein. Stereoskopische Bilder dieser Zone erwecken den Eindruck eines Blickes in das Innere eines Handschuhes. Zwischen den Odontoblastenfortsätzen verlaufen zarte, organische Fibrillen.

V. LITERATURÜBERSICHT

A. SCHMELZ

Die elektronenmikroskopische Erforschung der Zahnhartsubstanz wurde durch KECK (1944) eingeleitet (zit. nach HELMCKE 18). Wie bereits erwähnt, gelang es ihm nach mechanischer Zerkleinerung von Zähnen einzelne Kristallite zu isolieren und im Elektronenmikroskop darzustellen. Mit dieser Methode konnte über die Lagebeziehung der kleinsten Einheiten des Schmelzes natürlich keine Aussage gemacht werden. Neue Präparationsmethoden waren hierzu notwendig, die den Anforderungen der Elektronenmikroskopie genügten, denn die lichtmikroskopischen erwiesen sich als ungeeignet.

Eine genauere Untersuchung der Zahnschmelzsubstanz wurde erst durch die Einführung von Ersatzpräparaten möglich, die genauestens das Originalobjekt wiedergaben.

Die Voraussetzung hierzu wurde durch die Abdruck- und Bedampfungsmethode von SCOTT und WYCKOFF (60) geschaffen, wobei sie selbst aber dieses Verfahren für die Lichtmikroskopie entwickelt hatten. Die Autoren gewannen von dem Objekt Abdruckhäutchen mit Hilfe von Lack und bedampften dieselben zur Kontrasterhöhung einseitig schräg im Hochvakuum mit Chrom. Die Objekte waren entweder unbehandelte Zahnschliffe oder solche, die zuvor angeätzt wurden.

Unabhängig von SCOTT und WYCKOFF entwickelten KÖNIG (40) und seine Mitarbeiter zur selben Zeit eine ähnliche aber bessere Methode. Der Abdruck wurde im Vakuum mit molekularem Wolframoxyd schräg und mit molekularem Siliziumoxyd senkrecht bedampft. Jetzt erst war die systematische Erforschung der Zahnhartsubstanz im Elektronenmikroskop möglich.

Als problematisch in der Anatomie und Pathologie des Zahnes betrachteten SCOTT und WYCKOFF im wesentlichen drei Punkte, die sie mit Hilfe des Elektronenmikroskopes zu lösen versuchten: 1. Ursprung und fortschreitende Entwicklung der Karies, 2. die Art, in der chemische Agentien wie Säuren und Fluoride die Zahnoberfläche beeinflussen und 3. die Wirkung von Zahnputzmitteln und Abkratzungen auf die Schmelzoberfläche.

Diese Probleme sind aber nur über die genaueste Kenntnis der normalen Zahnhartsubstanz lösbar.

Auch beiden obigen Autoren gelang es 1952 (62) ähnlich wie KECK kristallähnliche Partikel nach mechanischer Isolierung von einem eben verkalkten Affenzahn darzustellen. Über die natürliche Anordnung der Teilchen zueinander konnte von ihnen aber auch nichts ausgesagt werden.

Im selben Jahr noch beschrieben SCOTT, USSING, SOGNAES und WYCKOFF (64) die hauptsächlichen Schmelzstrukturen an Hand von Ultradünnschnitten durch die teilweise entmineralisierte oder noch nicht voll mineralisierte Zahnhartsubstanz. Es sind dies die Prismen, die interprismatische Substanz, Prismenhüllen und ein nur elektronenmikroskopisch sichtbares Netzwerk. Die Prismen, als der anorganische Teil des Schmelzes, zeigen granuläre oder aber auch mehr faserige Struktur. In der interprismatischen Substanz werden ebenfalls faserige Strukturen deutlich, die hier ein Geflecht bilden. Die Dicke der einzelnen fibrillenähnlichen Gebilde wird mit 20 bis 100 m μ angegeben, der Durchmesser der Maschenräume des Geflechtes mit 150 bis 300 m μ . In letzteren sollen sich Kristallite befinden. Am eben angelegten Schmelz können obige faserige Strukturen noch nicht beobachtet werden, wie von den Autoren an Mäusezähnen nachgewiesen wurde. In den Prismenscheiden, die nicht immer zu erkennen sind, was vom Grade der Ätzung und auch dem Schnittwinkel bei der Präparatgewinnung abhängen soll, ist ebenfalls ein fibrilläres Netzwerk zu erkennen. Die sublichtmikroskopischen fibrillären Strukturen werden also dargestellt durch jene

in der interprismatischen Substanz, den Prismenhüllen und in den Prismen selbst.

Besonders eingehend mit dem Bau der Prismen und deren Morphologie befasste sich SYRRIST (66). Sie bestehen nach seiner Ansicht aus Kristalliten von annähernd rundem bis ovalem Querschnitt. Die Längsachse dieser Kristallite soll fast parallel zur Prismenlängsachse liegen. Der Querschnitt der kleinsten Bauelemente kann stark variieren. Ihr Mittelwert soll etwa 10 μ betragen. Die Prismen besitzen eine organische Scheide, die verkalkte Substanzen enthält. Von dieser Prismenscheide zweigt organisches Material in das Prismainnere ab und zwar so, dass jeder einzelne Kristallit von einer organischen, mineralhaltigen Hülle umgeben ist. Als bemerkenswert stellt der Autor fest, dass bei Säurereinwirkung auf den Schmelz in den Prismen die Gebiete unmittelbar neben der Scheide angegriffen werden.

Die Präparationsmethode KÖNIGS machte sich MENKE (50, 51) zu eigen, erweiterte diese aber durch Verwendung von Pankreon, einem Ferment der Bauchspeicheldrüse. Von frisch extrahierten Zähnen wurden von ihm Schliffe hergestellt, die mit besonderer Sorgfalt poliert, um jegliche Schleifspuren zu entfernen und sodann mit Pankreon bzw. n/10 HCl behandelt wurden. Die Abdrucknahme und Bedampfung erfolgte wie bei KÖNIG. Sinn dieser unterschiedlichen Behandlung der Schliffe ist es, die beiden in ihren chemischen Eigenschaften sich unterscheidenden Hauptsubstanzen (interprismatische Substanz und Prismen) des Schmelzes getrennt voneinander deutlich sichtbar zu machen. Werden Dünnschliffe mit Pankreon behandelt so wird die an organischer Materie reiche Masse, nämlich die interprismatische Substanz angedaut. Nach Abdrucknahme und Bedampfung tritt nun im Elektronenmikroskop die anorganische Substanz als Hochrelief hervor. Gleichzeitig hält der Autor die Andautung mit Pankreon als Beweis dafür, dass die interprismatische Substanz besonders reich an organischer Materie sei. Bei Verwendung von n/10 HCl sind die Verhältnisse umgekehrt. Da die Prismen säureempfindlicher sind, werden sie vor der interprismatischen Substanz angeätzt, und so erscheint nun diese als Hochrelief. Elektronenmikroskopisch ergeben sich folgende Befunde: Es konnte in keinem Falle auf Querschliffen eine Mosaikstruktur des Schmelzes beobachtet werden, wie sie sich darstellen würden, wenn es sich bei den Prismen um hexagonal begrenzte Säulen handelte. Die Prismen zeigen vielmehr arkadenförmige Figuren, die allseitig von interprismatischer Substanz umgeben sind. Die bislang als Prismen bezeichneten Gebilde verlaufen nach Ansicht des Autors wie gebündelte Drähte von der Schmelzdehtingrenze zur Schmelzoberfläche. Deshalb empfiehlt er diese in Anlehnung an seinen Lehrer BLECHSCHMIDT als Schmelzdrähte zu bezeichnen. In den Schmelzdrähten beobachtete MENKE Kristallite, die etwa 60 μ gross und alle in gleicher Richtung angelegt sind. Die von SCOTT, WYCKOFF und SYRRIST beschriebenen organischen Netzstrukturen im Inneren

des Prismas konnte von ihm trotz Verwendung von Pankreon nicht nachgewiesen werden.

Im Gegensatz zu den bisher angeführten Autoren haben BERNICK, BAKER, RUTHERFORD und WARREN (3) und mit ihnen KENNEDY (4) keine interprismatische Substanz an Ultradiünnschnitten durch den entmineralisierten Schmelz beobachtet. Dagegen seien auf elektronenmikroskopischen Aufnahmen organische Prismenhüllen von unterschiedlicher Dichte zu sehen, die miteinander verschmelzen und so eine interprismatische Substanz vortäuschen können. Bei diesem Gebilde muss es sich also nach Ansicht der Autoren um Fehldeutungen handeln. Die Prismen selbst stellen sich als inhomogen dar. Sie bestehen aus organischen und anorganischen Komponenten. Die anorganischen Bestandteile werden durch Vakuolen dargestellt, die durch den Entkalkungsprozess entstanden sind, um die Mineralien zu entfernen. Sie variieren in Grösse und Gestalt und zeigen keine regelmässige Orientierung im Prisma. Der Inhalt der Vakuolen wird in vivo wahrscheinlich durch zahlreiche Kristalle von unbestimmtem Habitus dargestellt. Zwischen diesen Mineralanhäufungen ist noch organische Substanz, die retikulär erscheint und gleichmässig im ganzen Prisma vorhanden ist. Hexagonal begrenzte Prismen konnten auch von diesen Autoren nirgends gesehen werden. Vielmehr ist der Prismenquerschnitt unregelmässig, was in Anlehnung an ORBAN (54) damit erklärt wird, dass die Verkalkung innerhalb der Prismen immer an einer Seite beginnt. Diese erhärtet infolgedessen früher als die anderen. Da nun die Verkalkung mit erhöhtem Druck verbunden ist, drückt die härtere in eine weichere noch nicht in Verkalkung begriffene Seite eines Prismas und hinterlässt dort einen dauernden Eindruck.

Auch FRANK (9, 10, 12) bediente sich zur Untersuchung des Schmelzes hauptsächlich der Ultradiünnschnitttechnik an entmineralisierten Zähnen. Seine Befunde stimmen im Wesentlichen mit jenen von SCOTT, USSING, SOGNAES, WYCKOFF und SYRRIST überein. Die Organische Masse des Schmelzes wird dargestellt durch interprismatische Substanz, Prismenhüllen und einem fibrillären Geflecht. Von den Prismenhüllen nimmt das fibrilläre Geflecht seinen Ausgang und durchsetzt jedes Prisma. Bei Entmineralisierung würde sich deshalb der Schmelz als ein Gerüst organischer Natur darstellen, woraus sich die Vorstellung des Autors über die Schmelzbildung ableitet: Zuerst wird dieses Gerüst gebildet, worauf dann die Kristallite in die Hohlräume hineinwachsen. Die Kristallite bestehen aus Hydroxylapatit und zeigen eine Länge von 750 bis 1 000 m μ und eine Breite von 70 bis 120 m μ . Die organische Substanz innerhalb eines Prismas schwindet nach Ansicht von FRANK mit zunehmendem Alter durch Mineralialzeininlagerungen, so dass bei älteren Menschen die Kristallite unmittelbar aneinander gelagert erscheinen.

Auch HALL (16) konnte beobachten, dass mit zunehmender Reife die organi-

schen Substanzen im Schmelz durch anorganisches Material ersetzt werden. Das von ihm beobachtete organische Netzwerk innerhalb eines Prismas entspricht dem von SCOTT. Die Zahl der Kristallite, die ein Maschenraum enthalten soll, beträgt zwischen 20 und 30. Bemerkenswert ist die Feststellung des Autors, dass beim eben durchbrechenden Zahn die Kristallite, hauptsächlich solche aus der cervikalen Region, ähnlich einer Briefmarke gezackt sind. Diese Zacken rühren von Fasern her, welche die Kristallite umhüllen, und sollen eine Periodizität von 32μ haben. Die Grösse der Kristallite wird mit 65μ Breite und ca. 400μ Länge angegeben.

Eine strukturelle Gliederung an den Kristalliten wird auch von HIRAI (28) geschildert. Er beschreibt Kristallite mit Streifen, wobei die Intervalle zwischen diesen 100 bis $300 \text{ \AA}$ betragen. Auch die Fibrillen des Schmelzes sollen Querstreifungsintervalle von ca. $270 \text{ \AA}$ zeigen.

Wie FRANK und HALL wiesen KOHÁRI und BÓNA (38, 39) Veränderungen der Schmelzmorphologie bei zunehmendem Alter nach. Für ihre Untersuchungen bedienten sich die beiden Autoren der Abdrucktechnik (Bedampfung mit Gold-Aluminium) an Schliffen von Zähnen, die von verschiedenen Altersgruppen stammen. Die Befunde waren folgende: Sämtliche mit der Alterung zusammenhängenden Prozesse nehmen an der Schmelzoberfläche ihren Ausgang und schreiten gegen die Schmelzdentingrenze vor, was sich darin zeigt, dass die an organischem Material reichen, hexagonalen Prismengrenzen (= Prismenhüllen) sich bei jungen Individuen über den Grossteil der Schmelzdicke finden. Bei einem 60 Jährigen z.B. treten derartig scharf begrenzte Prismen nur noch in unmittelbarer Nähe des Dentins auf. In allen anderen Schmelzregionen sind die Prismengrenzen ganz verwischt oder nur noch als runde oder mehrzipfelige Gebilde zu erkennen. Der Alteungsprozess innerhalb eines jeden Prismas ist derart, dass die Zahl der Kristallite zunimmt. Sie ordnen sich raumgitterartig in den retikulären, organischen Grundstoff des Prismas ein. Die ständig zunehmende Zahl der Kristallite bedingt die Verwischung der organischen Binnensubstanz der Prismen, ferner der an organischer Masse besonders reichen Zentren und der organischen Prismengrenzen. Die interprismatische Substanz wird immer stärker eingeeengt, so dass die Zähne älterer Menschen elektronenmikroskopisch keine solche mehr zeigen. Bei der eingehenden Untersuchung der organischen Materie des Schmelzes fanden die beiden Autoren, dass die Mikrostruktur von Binnensubstanzen, Prismengrenzen und interprismatischer Substanz völlig übereinstimmt. Die organische Masse soll aus Proteinen bestehen.

Die bisher aus der Literatur bekannte Vorstellung über den Bau eines Prismas, dass Kristallite in einem organischen Netzwerk eingebettet liegen, wird durch KOHÁRI und BÓNA ergänzt. Sie fanden nämlich "Mikroprismen" innerhalb der Prismen, die kleinere Ebenbilder darstellen, denn sie sind genau so

dimensioniert wie jene. Die "Mikroprismen" sollen auf der Prismenachse, die durch reichlichere organische Substanz gekennzeichnet ist, mit ihren "Mikroachsen" aufwachsen. Die "Mikroachsen" sind dann mit den Kristalliten besetzt. Es entsteht somit das Bild eines "Tannenzweiges". Die Zahl der Mikroprismen, die im Prismenquerschnitt gefunden werden können, soll 25 bis 35 betragen.

Neben Proteine fand LITTLE (49) als zweite Hauptkomponente der organischen Masse des Schmelzes noch β -Keratin von grösserer Dichte als die Proteinstrukturen, weshalb nach dessen Ansicht der Kariesbeginn bei letzteren erfolgt.

Die von HÖHLING veröffentlichten Arbeiten (29, 31) bestätigen im Wesentlichen die Befunde HELMCKES: Prismenhüllen und interprismatische Substanz existieren nicht. Der Autor bediente sich hierzu hauptsächlich der Triafolabdruckmethode an polierten, unvorbehandelten oder angeätzten Zahnschliffen (Schragbeschattung mit SiO und senkrechte Kohlebedampfung).

Entgegen der von HELMCKE vertretenen Meinung fand HÖHLING aber mit Hilfe von Ultradünnschnitten durch den nicht entmineralisierten Schmelz, dass die Kristallite einen bestimmten Habitus besitzen. Während die Schmelzprismen nie oder nur zufällig hexagonal begrenzt sind, zeigen die Kristallite deutlich derartige Begrenzungslinien. Bei ihnen soll es sich also um "echte Prismen" handeln. Häufig seien den Kristalliten hexagonale Pyramiden aufgesetzt, wodurch eine für die Festigkeit des Zahnschmelzes günstige Verzahnung gegeben ist. Über die Art der Kristallitverzahnung kann der Autor aber noch keine genauen Angaben machen.

B. DENTIN

Steht beim Schmelz die Existenz von Prismenhüllen und interprismatischer Substanz im Brennpunkt wissenschaftlicher Auseinandersetzungen, so ist es beim Dentin die Morphologie der Odontoblastenfortsätze und ihrer näheren Umgebung, zumal durch sie schon durch verschiedene Autoren die Möglichkeit eines Stoffwechsels im Dentin erörtert wurde. Ferner scheint auch durch die Elektronenmikroskopie die Frage nach der Neumannschen Scheide noch nicht völlig geklärt zu sein.

Als erste veröffentlichten RICHARDS und THOMASSEN 1944 (57) elektronenmikroskopische Bilder von Abdrücken (mit Polystyrol), die an Schliffen und Brüchen durch das Dentin gewonnen wurden. Auf diesen sind Dentinkanäle in ihrem Längsverlauf zu sehen.

Im darauffolgenden Jahr gelang es GEROULD (14) einzelne Odontoblastenfortsätze abzubilden indem diese an dem Abdruckmaterial (Polystyrol) haften blieben und so aus den Dentinkanälchen herausgerissen wurden. GEROULD beschrieb die Fortsätze als dünnwandige Röhren, die die Dentinkanälchen vollständig ausfüllen.

Ihre am Schmelz erprobte und verbesserte Abdrucktechnik verwandten SCOTT und WYCKOFF (60, 61) auch zur Erforschung des Dentins. Durch die einseitig schräge Bedampfung von Celloidinabdrücken erzielten sie einen plastischen Eindruck ihrer elektronenmikroskopischen Bilder. Der Odontoblastenfortsatz soll nach Ansicht der Autoren aus einer Zentralfaser bestehen, welche sich aus feinsten Fibrillen zusammensetzt und von einem dünnen, membranartigen Gebilde umgeben ist. In geringem Abstand von dem Fortsatz fanden sie eine Hülle als Begrenzung des Dentinkanälchens. Ob es sich hierbei um die viel diskutierte Neumannsche Scheide handelt, konnte von ihnen nicht geklärt werden.

Die Odontoblastenfortsätze zeigen Seitenzweige, die nahezu im rechten Winkel von ihnen abgehen und durch die Dentinegrundsubstanz ziehen. Sie sollen mit jenen benachbarter Fortsätze anastomosieren. Gegen Säure und Pepsinverdauung zeigen sie wie die Odontoblastenfortsätze hohe Resistenz. In die Grundsubstanz sind ausserdem Fibrillen mit typischer Querstreifung ähnlich den Kollagenfibrillen eingelagert. Hiervon können zwei Faserarten unterschieden werden: Dickere von $0,1\ \mu$ und dünnere von $0,01$ bis $0,1\ \mu$ Durchmesser.

Eingehender mit dem Problem der Neumannschen Scheide befassten sich SYRRIST (66) sowie SYRRIST und GUSTAFSON (67). Die Frage nach der Existenz einer solchen Scheide geht auf NEUMANN (1863) zurück (zit. nach W. MEYER). Dieser war der Meinung, dass die äusserst zarten Odontoblastenfortsätze von einer zusätzlichen Hülle umgeben sein müssten, denn er konnte sich nicht vorstellen, dass isolierte Fortsätze einer Behandlung mit Laugen und Säuren standhalten könnten ohne eine zusätzliche, schützende Hülle. Aber schon Lichtmikroskopiker, z. B. W. MEYER wiesen nach, dass es sich bei der Neumannschen Scheide um Täuschungseffekte im Sinne von Interferenz- und Beugungserscheinungen handeln müsse (W. MEYER - 52, Abb. 64a und 64b). Auch obige Elektronenmikroskopiker fanden keine Neumannsche Scheide. Sie bedienten sich für ihre Untersuchungen der Trockeneinfrierung. Hierbei werden die Präparate augenblicklich auf -195° gebracht, worauf sie einreissen und unberührte Bruchflächen erhalten werden, von denen dann Abdruck genommen werden kann. Die Odontoblastenfortsätze sind röhrenförmige Gebilde, die in vivo mit Protoplasma ausgefüllt sein sollen und den Dentinkanälchen völlig anliegen. An den Kanalwandungen finden sich Eindrücke, die von teils organischen Fäden und teils von anorganischen Substanzen in Form von Kristalliten herkommen müssen. Die Befunde der Autoren stimmen also weitgehend mit jenen von GEROULD

und HELMCKE überein. Auch SYRRIST fand wie SCOTT und WYCKOFF, dass die Seitenzweige der Odontoblastenfortsätze miteinander anastomosieren.

Durch die elektronenmikroskopischen Veröffentlichungen von HELLWIG und MENKE (17) sowie MENKE (50, 51) hat sich der wissenschaftliche Streit über die Morphologie der Odontoblastenfortsätze weiter vertieft. Die Odontoblastenfortsätze sollen aus einem Bündel von Fibrillen bestehen, die in ihrem Aufbau den Neurofibrillen markscheidenloser Nerven gleichen. Sie zeigen wie diese Querstreifungen in einer grossen Periode von 645 Å und einer kleineren von 145 Å. Da für die Reizleitung im Dentin bislang keine eigenen Faserelemente gefunden wurden, müsse diese den Fibrillen der Tomesschen Fasern zugesprochen werden. Im Verlauf der Tomesschen Fasern scheren einzelne Fibrillen als Stammfortsätze im spitzen Winkel von diesen aus und verlaufen stark gewunden durch die Grundsubstanz. Sie können die dreifache Länge, wie der Abstand zweier benachbarter Odontoblastenfortsätze beträgt, erreichen. Von den Stammfortsätzen gehen wiederum einzelne Seitenzweige ab. Sowohl Stammfortsätze als auch Seitenzweige zeigen obige grosse und kleine Perioden (bei Vergrösserungen um 1 : 52 500). Anastomosen zwischen den Seitenästen benachbarter Tomesscher Fasern sind möglich. Eine Hülle um dieselben im Sinne der Neumannschen Scheide konnte nicht festgestellt werden, vielmehr liegt das Fibrillenbündel (= Tomessche Faser) unmittelbar der Wandung eines Dentinkanälchens an. MENKE beobachtete ferner, dass die Dentine Grundsubstanz unmittelbar um die Dentinkanälchen (= perikanalikuläres Dentin) von anderer Beschaffenheit sein muss als das interkanalikuläre Dentin (entspricht dem restlichen Dentin). Jenes unterliegt nämlich sowohl mechanischer Beanspruchung (z.B. Polieren bei Präparatgewinnung) als auch Säurebehandlung in stärkerem Masse als letzteres. Der Autor diskutiert die Möglichkeit, dass es sich beim perikanalikulären Dentin um An- und Umbaubezirke handle, und der fortschreitenden Karies den geringsten Widerstand entgegensetze.

Während SCOTT, WYCKOFF, SYRRIST, GUSTAFSON sowie HELLWIG und MENKE Anastomosen zwischen den Seitenästen der Tomesschen Fasern feststellen, wird die Existenz derer in den Arbeiten von ROULLER (58) und ROULLER, HUBER und RUTISHAUSER (59) abgelehnt. Die Tomesschen Fasern bestehen aus zahlreichen, feinen Fibrillen, von denen einzelne in die Grundsubstanz des Dentins ziehen. Diese zeigen eine Querstreifung von 611 bis 620 Å und haben einen Durchmesser von 700 Å. In der Dentine Grundsubstanz überkreuzen sie sich derart, dass ein Netzwerk entsteht, in dessen Maschenräumen die Dentinkanälchen eingebettet liegen. Die Fibrillen sind im Dentin nicht überall in gleicher Dichte vorhanden, so dass fibrillenarme mit fibrillenreichen Zonen abwechseln, die den Anbaulinien v. EBNERS entsprechen sollen. Die Tomesschen Fasern sind nach ROULLER von einer zarten Scheide umgeben, gebildet von Fibrillen wel-

che in konzentrischen Spiralen jene umspinnen. Ob ein Spalt zwischen dieser Scheide und der Tomesschen Faser besteht, konnte von den Autoren nicht geklärt werden. Wahrscheinlich ist diese aber eng mit der Grundsubstanz verbunden. Dass es sich hierbei aber nicht um die Neumannsche Scheide handeln kann, geht daraus hervor, dass bei Säureeinwirkung die Tomesschen Fasern selbst resistenter sind als die sie umgebenden Hüllen, während ja NEUMANN das Umgekehrte annahm.

Einen Spalt zwischen der Tomesschen Faser und einer Membran, welche der Innenwand der Dentinkanälchen anhängt, wollen die Japaner KATO, SAKUMA und TAMURA (34) festgestellt haben.

Auf Grund seiner elektronenmikroskopischen Untersuchungen an entkalkten Dünnschnitten kam FRANK (10, 11, 12, 13) zu der Auffassung, dass sich die Odontoblastenfortsätze in ihrem Verlauf von der Pulpa zur Schmelzdentingrenze verändern. Nahe der Pulpa sollen die Fortsätze mehr zytoplasmatischen Charakter haben und das gesamte Lumen der Dentinkanälchen ausfüllen. In etwas fernerer Dentinzonen von der Pulpa will er dagegen mehr tubuläre Formen beobachtet haben. Auch FRANK konnte die Neumannsche Scheide nicht nachweisen, wohl aber eine Zone direkt um die Dentinkanälchen (= peritubuläres Dentin) welche stärker verkalkt sein soll als die übrige Grundsubstanz. In ihr ist ein Fibrillennetz von besonderer Feinheit. Eine scharfe Grenze zwischen dieser peritubulären Zone und den Tomesschen Fasern besteht nicht. Letztere sollen aus einer Hauptfaser, die durch Fibrillen von 0,2 bis 0,04 μ Dicke aufgebaut werden, bestehen. Gelegentlich zweigen von der Hauptfaser einzelne Fibrillen ab und durchziehen unter weiterer Verästelung die Grundsubstanz, um schliesslich mit jenen benachbarter Tomesscher Fasern zu anastomosieren. Die übrige Dentingrundsubstanz (intertubuläre Zone) besteht aus verschiedenartigen Kollagenfibrillen, die durch eine amorphe Kittsubstanz verbunden werden. Ausserdem fand FRANK in ihr noch Apatitkristalle von 400 bis 800 Å Länge.

Von BERNICK, BAKER, RUTHERFORD und WARREN (3) wird peritubuläres Dentin, das sich in seiner Beschaffenheit von der übrigen Dentingrundsubstanz unterscheiden soll, wie es MENKE und FRANK beschrieben, an Dünnschnitten nicht beobachtet. Die Dentinröhrchen stellen sich im Querschnitt unter dem Elektronenmikroskop als unregelmässige Kanäle mit keiner bestimmten Grenze dar. Dentinverdichtungen in diesem Bereich oder membranartige Gebilde, die als Neumannsche Scheide gedeutet werden könnten, wurden nicht gefunden. Die Autoren deuten also die Dentinkanälchen als blosse Aussparung der Grundsubstanz. Letztere zeigt fibrilläre Natur mit anorganischer Materie vermengt, wobei die Fibrillen Querstreifen im Abstand von 640 Å aufweisen. Die Odontobla-

stenfortsätze gleichen in ihrer Struktur jener des Zytoplasmas isolierter Odontoblasten und füllen die Dentinkanälchen völlig aus.

Diese elektronenmikroskopischen Befunde werden von KENNEDY, TEUSCHER und FOSDICK (37) bestätigt. Um den zytoplastischen Odontoblastenfortsatz fanden sie allerdings noch eine membranartige Hülle, welche in vivo eng den Wänden der Kanälchen anliegt.

SHROFF, WILLIAMSON, BERTAUD und HALL (65) deuteten den Odontoblastenfortsatz als aus mehreren Strukturlagen bestehend. Ein zentraler Kern von labiler Proteinnatur sei von einer dünnen, organischen Scheide unmittelbar umgeben. Auf sie folgt eine dickere, deren Substanz etwas von den Eigenschaften des Myelin besitzt und schliesslich ist der ganze Fortsatz wiederum von einer dünnen Hülle umgeben, welche aus feinen Fibrillen besteht, von denen einige kollagener Natur zu sein scheinen. Die Autoren weisen auf die auffällig strukturelle Ähnlichkeit mit Nervenfasern hin, wobei sie aber die Frage der Reizleitung durch die Odontoblastenfortsätze nicht klären können. Um die Fortsätze beschreiben sie ferner dicke, stark verkalkte Röhrenwände, welche von fibrillären Trabekeln gekreuzt werden. Diese Röhren sind von der übrigen Dentinegrundsubstanz (Intertubularmatrix) durch eine weitere kollagenfibrilläre Scheide getrennt, dabei verlaufen die Kollagenfibrillen in Schneckenschalenwindungen der verkalkten Röhrenwand entlang. In dieser Scheide strahlen ausserdem Fibrillen von der Intertubularmatrix einerseits und solche von der Aussenscheide des Odontoblastenfortsatzes andererseits ein.

Auch PETER (55) beschreibt in seiner Arbeit mantelartige Gebilde (peritubuläres Dentin), welche die Dentinkanälchen umgeben. Diese gehören wohl zur übrigen Grundsubstanz und gehen in dieselbe ohne trennende Hülle über, setzen sich aber im elektronenmikroskopischen Bild durch eine andere Strukturierung von dem Intertubulärdentin deutlich ab. Seine Untersuchungen erfolgten an Zähnen des Tümmlers, die bezüglich der Morphologie jenen des Menschen gleichen sollen.

Besonders eingehend haben sich PLÁČKOVÁ, PŘIBYL und ŠTĚPÁNEK (56) mit der Frage nach der peritubulären und intertubulären Dentinegrundsubstanz befasst. Sie suchten zu ergründen ob Veränderungen der peritubulären Grundsubstanz örtlich bedingt sind und ob der Reifeprozess des Dentins Einfluss auf dieselbe hat. Dazu bedienten sie sich der Abdrucktechnik an Schliffrücken und Brüchen durch Milch- und bleibende Zähne verschiedener Altersgruppen. Die Befunde sind folgende: Das intertubuläre Dentin ist bei bleibenden Zähnen fein bis grobkörnig, während die peritubuläre Zone nahezu glatt ist. Letztere findet sich in der gesamten Ausdehnung des Dentins und variiert in ihrer Breite von 0,5 bis 1,5 μ . Ihr Vorkommen ist vom Alter des Zahnes völlig unabhängig und daher natürlich

auch von der "Dentinreifung".

Dies bestätigen Untersuchungen von TAKUMA (68), der eine stärker verkalkte Zone um den Odontoblastenfortsatz auch schon an noch nicht durchgebrochenen bleibenden Zähnen fand.

Die Dentinegrundsubstanz der Milchzähne weicht nach PLAČKOVÁ gegenüber den bleibenden Zähnen etwas ab. Das Intertubulärdentin ist stark grobkörnig und zeigt teilweise fibrilläre Strukturen mit Querstreifung. Die peritubuläre Zone (Peritubulärdentin) kann ausgebildet sein, sie kann aber auch völlig fehlen. In ihr sind ebenfalls Fibrillen, die aber durch Kalkablagerungen maskiert sein können.

Wie FRANK und MENKE fanden auch diese Autoren, dass die peritubuläre Zone säureempfindlicher ist als das Intertubulärdentin.

Ob mit zunehmendem Alter das Peritubulär- und Intertubulärdentin Veränderungen unterliegt, suchten auch KOHÁRI und BÓNA (38) in Erfahrung zu bringen. Ihre Ergebnisse widersprechen völlig denen obiger Autoren. Das Vorgehen und die Präparationsmethode ist die gleiche wie bei ihren Untersuchungen am Schmelz. Sie bedienen sich der von BRADFORD (zit. nach KOHÁRI) vorgeschlagenen neuen Terminologie: "Dentinsystem" und "intersystemaler Raum". Das Dentinsystem umfasst den Odontoblastenfortsatz und die benachbarten Strukturen bis zum Intertubulärdentin. Der intersystemale Raum entspricht der restlichen Dentinegrundsubstanz. Die Alterungsprozesse am intersystemalen Raum sind derart, dass die in der Jugend reichlich vorkommenden Fibrillen, in homogener Grundsubstanz eingelagert, spärlicher werden. Der intersystemale Raum nimmt immer stärker granulären Charakter an. Deutlicher noch als am intersystemalen Raum können die Alterungsprozesse am Dentinsystem beobachtet werden. Bei jugendlichen Zähnen besteht um den Odontoblastenfortsatz eine afibröse Zone (fibrillen- und kalkarm). Mit zunehmendem Alter wächst um den Odontoblastenfortsatz eine kalkreiche Zone auf (die area translucens), die letztlich die afibröse Zone verschwinden lässt und weit in den intersystemalen Raum sich hinein ausbreitet. Die area translucens wächst aber auch gegen den Odontoblastenfortsatz vor und füllt im hohen Alter den Raum desselben nahezu aus. Damit sei nach KOHÁRI die Abnahme der Dentinsensibilität bei älteren Menschen erklärt.

In einer früheren Arbeit (15) fanden HAJOSI, KOHÁRI und BÓNA drei Formen von Fibrillen im intersystemalen Raum mit einem Durchmesser von 100 bis 200 Å: 1. Gestreifte Fibrillen mit Intervallen von 650 Å, 2. solche mit Intervallen von 2000 Å und 3. strukturloses Kollagen. Die Tomesschen Fasern fanden sie von einem fibrillären Netzwerk umgeben.

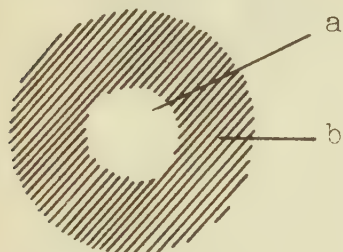
Die gleiche Präparationsmethode wie beim Schmelz verwandte HÖHLING (30) für die Untersuchung des Dentins. Auch er fand einen deutlichen Hofbezirk (area translucens) um die Odontoblastenfortsätze, welcher gegenüber dem Intertubu-

läridentin glatter erscheint. Dieser ist wesentlich härter als die übrige Dentin-grundsubstanz und müsse aus noch kleineren Bauelementen bestehen als das Inter-tubuläridentin, wodurch die relative Glätte erklärt werden könne. Die elektronen-mikroskopischen Bilder des Autors bestätigen die Ansicht jener Forscher, welche eine trennende Hülle zwischen Peritubulär- und Intertubuläridentin nicht beschrei-ben, wie sie ja aber SCHROFF und seine Mitarbeiter beobachtet haben wollen. Das Intertubuläridentin besteht aus einem netzartigen Geflecht von kollagenen Fi-brillen mit einem Durchmesser von 6 bis 12 μ . In dieses sind Hydroxylapatit-kristalle eingelagert, die aber wesentlich kleiner sind als jene des Schmelzes. Bei Vergrößerungen um 1 : 40 000 will HÖHLING eine Parallelorientierung der Kristallite zu den Fibrillen gesehen haben. Wie beim Schmelz sollen auch die Kristallite des Dentins hexagonale Pyramiden besitzen.

JOHANSEN und PACKS (33) beschreiben die Dentinkristallite als von der Seite gesehen platte und in der Aufsicht nahezu zylindrische Gebilde.

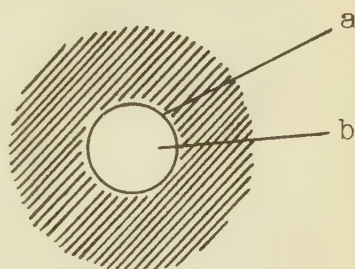
In den neueren Arbeiten von AKAZAWA (1, 2) wird ebenfalls Peritubuläridentin beschrieben, das sich durch besonderen Kalkreichtum auszeichnet und fein fib-rilläre Strukturen zeigt.

Nachfolgende schematisierte Skizzen sollen die Morphologie des Odontoblastenfortsatzes, wie sie von obigen Autoren gedeutet wurde, noch einmal veranschaulichen.



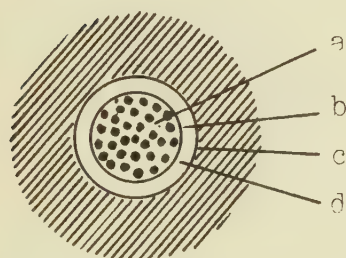
- a) Odontoblastenfortsatz
(= zytoplasmatischer Natur)
 - b) Dentinegrundsubstanz
- Zwischen a) und b) keine bestimmte Grenze

BERNICK, BAKER, RUTHERFORD,
WARREN

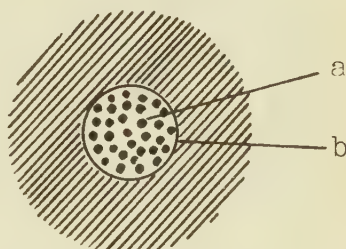


- a) Membranartige Hülle
 - b) Zytoplasma
- a) und b) = Odontoblastenfortsatz

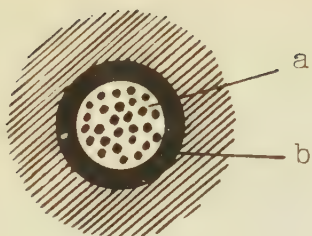
GEROULD, SYRRIST, GUSTAFSON,
HELMCKE, LENZ, KENNEDY, TEUSCHER,
FOSDICK



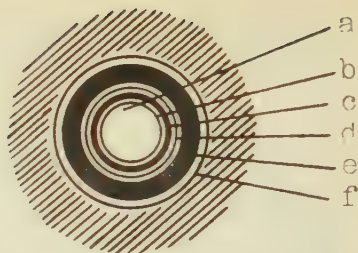
- a) Odontoblastenfortsatz
(= Fibrillenbündel)
 - b) und c) membranartige Hüllen
 - d) Spalt zwischen b) und c)
- SCOTT, WYCKOFF



- a) Odontoblastenfortsatz
(= Fibrillenbündel)
 - b) Fibrillenhülle (innig mit der Grundsubstanz verbunden)
- ROUILLER, HUBER, RUTISHAUSER



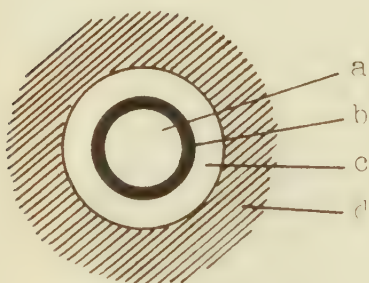
- a) Odontoblastenfortsatz
(= Fibrillenbündel)
- b) Perikanalikuläres Dentin
(= Peritubuläres Dentin)



- a) Zentraler Kern (von labiler Protein-
natur)
- b) Dünne, organische Scheide
- c) Dickere Scheide (myelinartig)
- d) Fibrillenhülle
- e) Stark verkalkte Röhrenwand
- f) Fibrillenscheide
- a), b), c), d) = Odontoblasten-
fortsatz

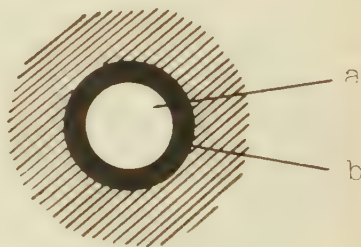
HELLWIG, MENKE, FRANK, TAKUMA

SHROFF, WILLIAMSON, BERTAUD,
HALL



- a) Odontoblastenfortsatz (über dessen
Morphologie werden keine Angaben
gemacht)
- b) area translucens (kalkreich) im An-
wachsen begriffen
- c) afibröse Zone (fibrillen- und kalk-
arm)
- a), b), c) = Dentinsystem
- d) Intersystemaler Raum

KOHÁRI, BÓNA



- a) Odontoblastenfortsatz (über des-
sen Morphologie werden keine An-
gaben gemacht)
- b) Stark verkalktes Peritubulärden-
tin

PLAČKOVÁ, PŘIBYL, ŠTĚPÁNEK,
HÖHLING, AKAZAWA

VI. DISKUSSION

Am auffälligsten bei der Literaturdurchsicht über den elektronenmikroskopischen Bau des Zahnschmelzes sind die sich widersprechenden Befunde über die Existenz von interprismatischer Substanz und Prismenhüllen. Die Lichtmikroskopiker stehen heute allgemein auf dem Standpunkt, dass obige Gebilde vorhanden seien. Der einzige Aussenseiter unter ihnen war WALKHOFF (zit. nach MEYER), nach dessen Meinung eine interprismatische Substanz nicht existiert. W. MEYER will aber nachgewiesen haben (52), dass dieser einem optischen Täuschungseffekt zum Opfer fiel. Das Vorhandensein der fraglichen Strukturen wurde auch noch durch die Elektronenmikroskopiker wie SCOTT, USSING, SOGNAES, WYCKOFF, SYRRIST, MENKE, FRANK, KOHÁRI u. a. bestätigt. Die gegenteiligen elektronenmikroskopischen Befunde von BERNICK, BAKER, RUTHERFORD, WARREN, HELMCKE und LENZ werden deshalb heute noch, trotz erdrückender Beweisführung insbesondere durch LENZ, skeptisch aufgenommen.

Stark angegriffen wurden HELMCKE und LENZ von KEIL (36), der diesen vorwarf, all zu weitreichende Schlüsse über die Schmelzmorphologie gezogen zu haben, ohne dabei auf der klassischen, durch die Lichtmikroskopie entwickelten und durch die Polarisationsmikroskopie untermauerten Lehrmeinung aufzubauen. Von KEIL wird ferner die Bruchflächenmethode der beiden Autoren verurteilt, da nach dessen Ansicht Bruchflächen beliebig die Zahnhartsubstanz durchsetzen und deshalb zu wahllosen Deutungen Anlass geben können. Dem muss aber entgegengesetzt werden, dass sich HELMCKE und LENZ sämtlicher in der Elektronenmikroskopie üblichen Präparationsverfahren bedienen. Sie fanden die Befunde, welche sie mit ihrer Bruchflächenmethode gewonnen hatten, in allen Fällen bestätigt: Prismenhüllen und interprismatische Substanz existieren nicht!

Bei der lichtmikroskopisch gefundenen interprismatischen Substanz soll es sich nach HELMCKE und LENZ um Täuschungseffekte handeln. Das Zustandekommen dieser wird von den beiden Autoren folgendermassen erklärt: Wie in Kapitel IV erwähnt, vergleicht HELMCKE den Aufbau eines Prismas mit dem der Vogelfeder. Voraussetzung für diesen Vergleich ist allerdings, dass ein Prisma in seiner idealen Längsachse getroffen wird. Bei derartigen Bildern finden sich neben solchen Prismen elektronenmikroskopisch sichtbare stark punktierte Linien. Diese sind aber nun keine interprismatische Substanz oder Prismenhüllen, wofür sie die Lichtmikroskopie hält, sondern von der Bruchlinie am Rand durchgesetzte Prismen. Sie liegen entweder tiefer oder höher als jenes Prisma, welches in seiner Längsachse getroffen wurde. Die punktierten Linien sind deshalb radial von der jeweiligen Prismenlängsachse abstrahlende Kristallitzüge, was auf den Stereoaufnahmen der beiden Autoren deutlich wird. LENZ erklärt mit

dieser Tatsache auch die "falschen Deutungen" jener Elektronenmikroskopiker, die die Existenz der interprismatischen Substanz vertreten. Werden nämlich von solchen Objekten nur zwei dimensionale Aufnahmen angefertigt, wie es jene taten, so können auf ihnen die punktierten Linien als interprismatische Substanz gedeutet werden. Stereoaufnahmen vom selben Objekt ergeben aber, dass es sich um quergetroffene Kristallitzüge handelt.

Die Vorspiegelung einer interprismatischen Substanz im Lichtmikroskop kann aber auch nach HELMCKE und LENZ durch optische Gesetzmässigkeit zustande kommen. Da die meisten Bauelemente des Schmelzes weit unter dem Auflösungsvermögen des Lichtmikroskopes liegen, können sie mit diesen nicht gesehen werden. Den Eindruck, den man mit jenem Instrument erhält, kann also immer nur ein Summeneffekt sein. Bei auffallendem Licht dringt ein Teil der Strahlen in den transparenten Zahnschmelz ein, ein anderer wird aber reflektiert. Die Kombination beider Erscheinungen ergibt für den Betrachter einen "diffusen Schleier", der eine exakte Analyse verhindert. Bei durchfallendem Licht wirken die einzelnen Hydroxylapatitkristalle in bestimmter Weise lichtbrechend und lichtablenkend. Dort wo die Prismen aneinanderstossen, überkreuzen sich einzelne Kristallitzüge. Hier ist deshalb die Lichtbrechung eine andere als im Prismainneren, wo alle Kristallite annähernd gleich ausgerichtet sind. Auf diese Tatsachen führen beide Autoren eine weitere Möglichkeit der falschen Deutung der interprismatischen Substanz zurück. Damit geht HELMCKE (24) zum Gegenangriff auf KEIL über und fordert, dass sämtliche lichtmikroskopischen Befunde überprüft und notfalls korrigiert werden müssen.

Die Vertreter der Existenz einer interprismatischen Substanz glauben, dass diese von der Interzellulärsubstanz und dem Schlussleistennetz abstammt. Auf dieser Annahme beruht die noch heute allgemein anerkannte "alte" Anschauung. LENZ hat in seinen elektronenmikroskopischen Arbeiten über die Schmelzgenese (43, 44, 45) aufgezeigt, dass die Interzellulärsubstanz und das Schlussleistennetz nicht existieren. Damit scheint den Vertretern der interprismatischen Substanz die Grundlage ihrer Annahme entzogen zu sein. Es darf somit angenommen werden, dass das Problem "interprismatische Substanz" gelöst ist, da bislang von keinem Forscher eine gegenteilige Beweisführung angetreten werden konnte.

LENZ bediente sich für den Nachweis der Ultradünnschnitttechnik (Schnitt-dicke = 200 bis 400 Å) an Zahnkeimen von 4 bis 6 Monate alten menschlichen Föten. Das Material wurde nach Entnahme aus dem frischen Gewebe in isotoni-scher OsO_4 Lösung fixiert, in Methacrylat eingebettet und bei 600° polymerisiert. Zu lichtmikroskopischen Vergleichszwecken wurde ein Teil der Objekte auf die übliche Weise in Formalin fixiert. Durch Nachfixierung in OsO_4 konnte der Autor auch diese Objekte im Elektronenmikroskop betrachten. Die Ergeb-

nisse waren folgende: Die Ameloblasten werden nicht von einer Interzellularsubstanz voneinander getrennt, vielmehr liegen sie unmittelbar aneinander. Ihr Protoplasma ist von einer 200 bis 300 Å starken Membran gegen die Umgebung abgeschlossen. Interzellularbrücken aus denen die Intercolumnarbrücken hervorgehen sollen, existieren ebenfalls nicht. Das Schlussleistennetz zwischen stratum intermedium und Ameloblastenschicht, sowie jenes an der Basis der Ameloblasten ist elektronenmikroskopisch auch nicht nachweisbar.

Die vergleichende Untersuchung von in Formalin fixierten Präparaten mit solchen, in OsO_4 fixierten, welche unmittelbar aus dem frischen Gewebe entnommen wurden, ergaben, dass bei ersteren nur elektronenmikroskopisch sichtbare Zerstörungen des Protoplasmas der Ameloblasten auftraten. Diese Artefaktbildungen, bedingt durch die in der Lichtmikroskopie gebräuchliche Präparationsmethode, wurden bislang als reale Strukturen gedeutet und führten zu der Annahme, dass Interzellularsubstanz und Schlussleistennetz vorhanden seien. Mit Hilfe der vergleichenden licht- und elektronenmikroskopischen Untersuchungen gelangte LENZ hinsichtlich der Schmelzgenese auch noch zu weiteren neuen Erkenntnissen. Nach Bildung einer ersten Dentinscherbe ist eine deutliche Veränderung am Protoplasma der Ameloblasten festzustellen. Die zunächst mehr granuläre Struktur geht verloren und ein endoplasmatisches Reticulum tritt stark hervor. Gleichzeitig verschwinden die Zellgrenzen und die Zellen verschmelzen miteinander. Im Urschmelz kann unmittelbar nach diesem Vorgang, Dank des grossen Auflösungsvermögens des Elektronenmikroskops, ein feines, fibrilläres Netzwerk beobachtet werden. Die Vermutung MEYERS, dass der Urschmelz kein homogenes Gebilde sei, wie auf Grund von lichtoptischen Untersuchungen bislang angenommen wurde, hat sich damit bestätigt. Die Fibrillen sind aus dem Protoplasma der Ameloblasten durch Umwandlung desselben hervorgegangen, was ein Beweis für die Aktivität dieser Zellen ist. Jene fädigen Strukturen sind anfänglich zu Bündeln gelagert, wachsen dann aber durch Richtungswechsel fächerartig aufeinander zu. Die Gesamtheit der fibrillären Strukturen stellt die organische Matrix des Urschmelzes dar. Letzteres ist also ein Produkt der Ameloblasten. In ihr lassen sich noch deutlich jene fibrillären Bezirke unterscheiden, die jeweils aus einem Fibrillenbündel eines Ameloblasten hervorgegangen sind. Diese Bezirke wiederum bilden das organische Grundgerüst der einzelnen Prismen. In den Prismen sind die Fibrillen genau in der gleichen Weise orientiert wie im verkalkten Schmelz die Kristallite. Es scheint daher deutlich zu sein, dass bei der Verkalkung die organischen Fibrillen orientierend auf die Ausbildung der Hydroxylapatitkristalle einwirken. Die organische Matrix bestimmt also offenbar die Morphologie des verkalkten Schmelzes. Auch im Entwicklungsstadium der eben voll ausgebildeten Matrix konnte LENZ zwischen den einzelnen Fibrillenbezirken, die den Raum der später ver-

kalkten Prismen markieren, keine interprismatische Substanz oder entsprechende Spaltbildung nachweisen.

Während LENZ und sein Lehrer HELMCKE eine geordnete Lage der fibrillären Strukturen sowohl im Prae- als auch im vollverkalkten Schmelz annehmen, wird eine solche in den älteren Arbeiten von SCOTT, USSING, SOGNAES und WYCKOFF (64), BERNICK, BAKER, RUTHERFORD und WARREN (4) nicht beschrieben. Diese Autoren deuten ja die Schmelzmatrix als aus wirr durcheinanderlaufenden Fibrillen bestehend. Hier kann man sich aber nicht vorstellen, wie es zu einer geordneten Einlagerung der anorganischen Schmelzelemente kommen soll, wie sie ja neben LENZ und HELMCKE auch in den neueren Veröffentlichungen von BONA, KOHÁRI und HÖHLING beschrieben wurden.

SCOTT und seine Mitarbeiter beschrieben Hohlräume in dem fibrillären Netzwerk, deren Durchmesser 150 bis 300 $\mu\mu$ betragen sollen. Hier können aber die Schmelzkristallite, deren Grösse von den meisten Autoren zwischen 400 und 1 000 $\mu\mu$ angegeben wird, nicht hineinpassen. Schon daraus kann geschlossen werden, dass die organische Matrix des Schmelzes bei der Präparationsweise, wie sie obige Autoren anwandten, Veränderungen unterlegen sein muss. LENZ konnte hierzu nachweisen, dass es bei den angewandten Entkalkungsmethoden in der Lichtmikroskopie und durch SCOTT und BERNICK auch in der Elektronenmikroskopie zu Schrumpfungen und Verlagerungen der Fibrillen kommt. Somit kann jenes fibrilläre Netzwerk nicht als wahres Abbild der Schmelzmatrix betrachtet werden.

Über die Morphologie der anorganischen Bestandteile des Schmelzes bestehen unter den Elektronenmikroskopikern keine derartig zahlreichen Widersprüche wie es bei der Schilderung der organischen Matrix der Fall ist. Übereinstimmend wird festgestellt, dass die kleinsten Schmelzeinheiten Kristallite aus Hydroxylapatit sind. Ihre Länge, soweit sie von den Autoren angegeben wird, schwankt zwischen 400 und 1 000 $\mu\mu$. Die Dicke wird von HELMCKE, LENZ und NECKEL zwischen 50 und 100 $\mu\mu$, von SYRRIST mit 10 $\mu\mu$, von FRANK mit 70 bis 120 $\mu\mu$, von DOUGLAS und HALL mit 65 $\mu\mu$ und von HÖHLING mit 70 $\mu\mu$ angegeben.

Während von keinem der Elektronenmikroskopiker eine bestimmte Form der kleinsten Schmelzeinheiten beschrieben, von HELMCKE und LENZ eine solche sogar abgestritten wird, ist HÖHLING der einzige, der einen bestimmten Habitus der Kristallite beobachtet haben will. Er bezeichnet sie als "echte" Prismen im Gegensatz zu den lichtmikroskopisch sichtbaren "unechten" Schmelzprismen.

Dass die Kristallite in bestimmter Weise in den Prismen angeordnet sind, wird von keinem der Autoren in Abrede gestellt. HELMCKE, LENZ und auch

HÖHLING sprechen von einer "komenteschweiförmigen" - KOHÁRI und BÓNA von einer "tannenzweigförmigen" Orientierung.

KOHÁRI und BÓNA haben während bestimmten Schmelzausreifungsgraden hexagonal begrenzte Prismen gesehen. Alle anderen Elektronenmikroskopiker konnten solche Prismengrenzen nicht beobachten, oder sie werden überhaupt als Fehldeutungen von ihnen abgelehnt. HELMCKE gibt eine Erklärung für das Zustandekommen dieser Täuschungseffekte (siehe Kapitel IV).

FRANK, KOHÁRI, BÓNA und HALL glauben auf Grund elektronenmikroskopischer Bilder von Zähnen verschiedener Altersgruppen, dass sich auch im Schmelz die Alterung des Gesamtorganismus abzeichnet. Sie ist hier durch vermehrte Mineralsalzeinlagerung bzw. Zunahme der Kristallite kenntlich.

Die Literaturdurchsicht der einschlägigen Arbeiten erweckt den Anschein, als ob auch durch das Elektronenmikroskop keine Klärung über den Aufbau der Dentinkanälchen und der Odontoblastenfortsätze erzielt worden sei.

SCOTT, MENKE, FRANK, KATO und ROUILLER wollen beobachtet haben, dass die Tomesschen Fasern aus einzelnen Fibrillen bestehen. GEROULD, SYRRIST, KENNEDY, HELMCKE und LENZ dagegen behaupten, der Odontoblastenfortsatz sei ein membranöses, schlauchartiges Gebilde mit protoplasmatischem Inhalt. Letzterer ist infolge der noch unzureichenden Präparationsmethoden der Elektronenmikroskopie verloren gegangen.

Die Vertreter einer fibrillären Struktur der Odontoblastenfortsätze haben nach Ansicht von LENZ eine Vermutung von SCOTT und WYCKOFF als Tatsache übernommen, denn diese schreiben: *there is a suggestion that additional fibers may be present within each dentinal fiber*. LENZ hat nämlich in zahlreichen Untersuchungen ähnliche elektronenmikroskopische Bilder von Odontoblastenfortsätzen erhalten wie diejenigen, aus denen SCOTT und WYCKOFF diese Deutungen ableiteten. Wurden dieselben Präparate aber von dem Autor stereoskopisch betrachtet, so war nichts von Fibrillen zu finden. Der fibrillenähnliche Eindruck wird nach LENZ durch zusammengefaltete und zerstörte Teile des Odontoblastenfortsatzes hervorgerufen, was nur mit stereoskopischen Aufnahmen deutlich wird.

Von den meisten Autoren wird übereinstimmend eine membranartige Hülle des Odontoblastenfortsatzes festgestellt. Klarheit darüber, ob diese Hülle zur Grundsubstanz gehört oder ein Teil der Tomesschen Faser ist, scheint nicht zu herrschen. ROUILLER, HUBER u. a. vertreten erstere Ansicht, SYRRIST, HELMCKE und LENZ u. a. letztere. SCOTT und WYCKOFF fanden gar zwei membranöse Hüllen von denen eine den Odontoblastenfortsatz umgibt und die zweite die Dentinkanälchen auskleidet.

BERNICK und seine Mitarbeiter haben keine Scheide bzw. Hülle gefunden. Sie lehnen die Existenz einer solchen ab.

Unter den Elektronenmikroskopikern ist JASUZUMI der einzige, der mit Bestimmtheit eine Neumannsche Scheide beobachtet haben will (32). Von allen anderen Autoren wird dagegen die Existenz derselben völlig abgelehnt, oder wenigstens die Frage nach ihr offen gelassen, weil diese durch das Elektronenmikroskop nicht entscheidbar sei, mangels geeigneter Präparationsmethoden.

MENKE, FRANK, SHROFF, PETER, PLAČKOVÁ, KOHÁRI, HÖHLING und TAKUMA u. a. fanden Peritubulärdentin (perikanalikuläres Dentin, area translucens). Während von FRANK, SHROFF, PLAČKOVÁ, KOHÁRI, HÖHLING und TAKUMA diese als harte Schicht beschrieben wird, bezeichnet sie MENKE als weiche Substanz gemessen an dem Intertubulärdentin. Übereinstimmend wird die grosse Säureempfindlichkeit des Peritubulärdentins beschrieben, was für die Ausbreitung der Karies bedeutungsvoll ist.

Auch HELMCKE fand um den Odontoblastenfortsatz zuweilen zylinderartige Gebilde, die dem Peritubulärdentin obiger Autoren entsprechen.

Im Intertubulärdentin wird von keinem Elektronenmikroskopiker eine derartige geordnete Lage der anorganischen Bestandteile beschrieben, wie sie von den meisten Autoren für den Schmelz geschildert wurde. HELMCKE, der diesbezüglich mit allen anderen Elektronenmikroskopikern übereinstimmt, wurde zu diesem Punkte seiner Veröffentlichungen von vielen Lichtmikroskopikern kritisiert. Insbesondere KEIL glaubt, dass die Lichtmikroskopie schon längst die gerichtete Lagerung der Kristallite im Intertubulärdentin bewiesen habe. Sie zeigen nach Ansicht dieses Autors im Wesentlichen drei Verlaufsrichtungen: 1. Sie sind entlang den kollagenen Fibrillenbündeln im Sinne der Owenschen Konturlinien ausgerichtet, 2. sie können entlang den Dentinkanälchen parallelisiert sein und 3. sind sie von der Tendenz sphäritischer Ablagerung beherrscht.

Bei seinen vergleichenden licht- und elektronenmikroskopischen Untersuchungen zur Erforschung der Schmelzgenese, suchte LENZ auch zu ergründen, ob über Reticulumfasern oder etwaige Ultrakapillaren der Schmelz in seinem "Stoffwechsel" mit der Blutbahn des übrigen Organismus in Verbindung steht. Diese Annahme von G. FISCHER und FORSHUFVUD ist nach den Befunden von LENZ nicht berechtigt. Das innere Schmelzepithel ist nämlich von der Pulpa durch eine ca. 300 Å starke "Grenzmembran" getrennt. Pulpenwärts heften sich an diese Fibrillen an, welche die erste Anlage des Dentins bilden. In keinem Entwicklungsstadium wird die Membran von Faserelementen durchbrochen.

Über den elektronenmikroskopischen Aufbau des Zahnzementes konnte ich bei der Literaturdurchsicht keine Angaben finden. Wohl haben HELMCKE (18) und AKAZAWA (1, 2) Bilder vom Zement veröffentlicht, sie gaben aber keine Er-

klärung über den Aufbau desselben ab. Teils mag dies daran liegen, dass das Zement bezüglich der Karies nur eine untergeordnete Rolle spielt und so im wissenschaftlichen Interesse neben Schmelz und Dentin verblasst, teils aber auch an der lockeren Strukturierung des Zements, was für die elektronenmikroskopische Präparatgewinnung ungeeignet ist. Auf diese Tatsache weist auch schon HELMCKE 1953 (18) hin.

Wie erklären sich nun die verschiedensten Deutungen der Schmelz- und Dentinmorphologie? Eine grosse Rolle scheinen die zur Anwendung gekommenen verschiedenen Präparationsverfahren zu spielen. Hierauf weisen eine Reihe von Elektronenmikroskopikern hin, unter ihnen insbesondere HELMCKE und LENZ. Letztere haben fast alle in der Elektronenmikroskopie gebräuchlichen Präparationsverfahren angewandt und die erzielten Ergebnisse miteinander verglichen. Sie konnten feststellen, dass je nach verwendeter Präparationstechnik die Befunde vom selben Objekt sich tatsächlich unterscheiden können. Mit Hilfe von Stereoaufnahmen aber, welche Betrachtungsweise in der zahnmedizinischen Forschung fast ausschliesslich von den beiden Autoren zur Anwendung gebracht wurde, konnten sie diese Befunde fast immer wieder in Übereinstimmung bringen. Die ausführlichen und vielseitigen elektronenmikroskopischen Untersuchungen von HELMCKE und LENZ müssen deshalb Veranlassung geben ihren Befunden besondere Beachtung zu schenken.

Ein weiterer wesentlicher Grund für die abweichende Auswertung von elektronenmikroskopischen Zahnpräparaten liegt offenbar auch darin, dass sich bisher nur relativ wenige Wissenschaftler dieses Fachgebietes mit der Elektronenmikroskopie beschäftigt haben und dann auch nur meist gelegentlich und mit beschränkten Hilfsmitteln. Dies trifft insbesondere für Deutschland zu. Durch die geringe Zahl an elektronenmikroskopischen Veröffentlichungen, verglichen mit lichtoptischen, ist es bisher nicht möglich gewesen, dass sich die eine oder andere Ansicht durch eine vielseitige Bestätigung hat durchsetzen können.

VII. ZUSAMMENFASSUNG

Die elektronenmikroskopischen Befunde an der Zahnhartsubstanz verschiedener Autoren wurden zusammengetragen, verglichen und ausgewertet.

A. SCHMELZ

1. Die kleinsten morphologischen Einheiten des Schmelzes sind Kristallite aus Hydroxylapatit.
2. Ein Schmelzprisma wird durch eine Vielzahl solcher Kristallite aufgebaut.
3. Die Kristallite sind in bestimmter Weise in den Prismen orientiert.
4. Über die Art der Kristallitorientierung besteht unter den Autoren noch keine völlige Übereinstimmung.
5. Im Gegensatz zu HELMCKE und den meisten anderen Elektronenmikroskopikern fand HÖHLING, dass die Kristallite einen bestimmten Habitus besitzen.
6. Die Schmelzprismen sind nach den Beobachtungen der meisten Autoren nicht hexagonal begrenzt.
7. In den Schmelzprismen bauen organische, fibrilläre Strukturen ein Netzwerk auf. Dieses konnte aber nicht von allen Elektronenmikroskopikern nachgewiesen werden.
8. Die Frage nach der Existenz von interprismatischer Substanz und Prismenhüllen steht nach wie vor im Brennpunkt wissenschaftlicher Auseinandersetzungen. Besondere Beachtung verdienen die diesbezüglichen Befunde an Zahnkeimen von LENZ, aufgrund deren er das Vorhandensein einer interprismatischen Substanz ablehnt.

B. DENTIN

1. Die Dentinegrundsubstanz wird durch kristallitähnliche Gebilde aus Hydroxylapatit und durch fibrilläre Strukturen dargestellt. Eine geordnete Lage der "Kristallite" wie beim Schmelz, existiert nicht.
2. Die Odontoblastenfortsätze sind gegen Säure resistent und isolierbar.
3. Nur von JASUZUMI wird diese Resistenz auf eine Neumannsche Scheide zurückgeführt. Von allen anderen Autoren wird die Existenz dieser abgelehnt.
4. Die Morphologie der Odontoblastenfortsätze und ihrer näheren Umgebung wird widersprüchlich geschildert. Die eine oder andere diesbezügliche Deutung eines Autors hat sich bislang noch nicht durchsetzen können.

C. ZEMENT

Über das Zement konnte ich elektronenmikroskopische Abbildungen von nur zwei Autoren finden. Diese gaben aber keine Erklärung über ihre Bilder.

Abschliessend sei es mir erlaubt Herrn Privatdozent
Dr. Dr. W. Ketterl für die Überlassung des Themas und
die rasche Durchsicht der Arbeit ergebenst zu danken.

Auch möchte ich es nicht versäumen, Frau Professor
Dr. Dr. M. Schug-Kösters für ihre freundliche Unterstüt-
zung zu danken, welche in der Bereitstellung für mich
wertvoller Literatur bestand.

VIII. LITERATURVERZEICHNIS

1. AKAZAWA, J.
Elektronenmikroskopische Untersuchungen des Dentins mit besonderer Berücksichtigung der Art jener Substanz, welche die Odontoblastenfortsätze umgibt.
Z.R. 72, H 5, 165 (1963); Auszug aus: The Journal of Nihon University School of Dentistry 1, 1962
2.
Elektronenmikroskopie des menschlichen Zements
ZR 73, H 3, 93 (1964); Auszug aus: The Journal of Nihon University School of Dentistry 3, 127 (1963)
3. BERNICKS, S.; R.F.BAKER; R.L.RUTHERFORD; O.WARREN
Electron microscopy of enamel and dentin
J.Amer.Dent.Ass. 45, H 6, 689 (1952)
4. BERNICK, S.; R.F.BAKER; R.L.RUTHERFORD; O.WARREN; J.J.KENNEDY
Elektronenmikroskopische Untersuchungen von Schmelz und Dentin
Referiert von H.J.SCHMIDT in DZZ 9, 687 (1954)
5. BRETSCHEIDER, L.H.
Das Prinzip des Elektronenmikroskops
Mikroskopie 3, 12 (1948)
6.
Anwendung und Ergebnisse der Elektronenmikroskopie
Mikroskopie 3, 160 (1948)
7.
Die Herstellung von dünnen Gewebsschnitten und ihre Untersuchung mit dem Elektronenmikroskop
Mikroskopie 5, 15 (1950)
8. DE BROGLIE zit. nach BRETSCHEIDER
9. FRANK, R.M. Untersuchungen der mikroskopischen Infrastruktur des Schmelzes und der freien Kronenfläche des Zahnes
Schw.Mschr.Zahnheilk. H 11, 60 (1950)
10.
Donnée récentes sur l'infrastructure de la dent fournis par les techniques de la microscopie électronique
Arch.stomat. 7, 127 (1952)

11. FRANK, R.M. Microscopie et diffraction électronique des éléments cristallins de la dent
ORCA, Communications du 4 ème Congrès, Lund 1957;
Odont.Revy 8, H 3, 288 (1957)
12. Contributions à l'étude au microscope électronique des tissus calcifiés normaux et pathologiques
Med.Diss. Strassbourg (1957)
13. Electron microscopy of undecalcified sections of human adult dentin
Arch.Oral.Biol.1, H 1, 29 (1959)
14. GEROULD, Ch.:
Ultramicrostructures of the human tooth as revealed by the electron microscope
J.Dent.Res.23, 239-245 (1945)
15. HAJÓSSI, G.; S.KOHÁRI; K.BÓNA
The enamel and dentin of sound human teeth under the electron microscope
Acta morph. (Budapest) 7, 113 (1956)
16. HALL, D.M. Study of the submicroscopic structure of human dental enamel by electron microscopy
J.Dent.Res.37, 58 (1958)
17. HELLWIG, G.; E.MENKE
Elektronenmikroskopie an Zellfortsätzen im menschlichen Zahn
Naturwissensch.36, 281-283 (1949)
18. HELMCKE, J.G.:
Atlas des menschlichen Zahnes im elektronenmikroskopischen Bild, I. Teil
Erschienen bei: Transmare-Photo Berlin (1953)
19. Anwendungsmöglichkeiten des Elektronenmikroskops in der Zahnanatomie und in der Zahnheilkunde
ZR. Berlin H 14, 410 (1954)
20. Elektronenmikroskopische Untersuchungen an gesunden und pathologischen Zähnen.
Schweiz.Mschr.Zahnhk.65, H 7, 619 (1955)

21. HELMCKE, J.G.
Elektronenmikroskopische Strukturuntersuchungen an gesunden und kranken Zähnen.
DZZ 10, H 22, 1461 (1955)
22.
Gesunde und kranke Zähne im Elektronenmikroskop.
W. HOLTZ berichtet über Ergebnisse HELMCKES in
Zahnärztl. Welt u. Reform 59, H 12, 337 (1958)
23.
Bedeutung der Elektronenmikroskopie für die Erforschung der Zahnhartsubstanz.
Sonderabdruck aus Göteborgs Tandläkare-Sällskaps Arsbok 1958
24.
Anatomie und Pathologie der Zahnhartsubstanz in kritischer Betrachtung neuerer mikroskopischer Forschungsmethode.
Dtsch. Z.M.K. 30, H 9, 312 (1959)
25.
Grenzen der licht- und polarisationsmikroskopischen Methoden in der Erforschung des Zahnschmelzes.
Mikroskopie 13, H 9-10, 313 (1959)
26.
Bau und Struktur der Zahnhartsubstanz
DZZ 15, H 3, 155 (1960)
27.
Demonstration von Stereobildern über den Bau und die Struktur der Zahnhartsubstanz
DZZ, H 3, 292 (1960)
28. HIRAI, G.
A contribution to the ultrastructure of the dental enamel by electron microscopy and electron diffraction.
Okajimas Folia anat. jap. 34, 111 (1959)
29. HÖHLING, H.J.
Elektronenmikroskopische Untersuchungen am gesunden und kariösen Zahnschmelz unter besonderer Berücksichtigung der Ultramikrotomschnittechnik an nicht entmineralisierter Substanz.
DZZ 16, H 10, 694 (1961)
30.
Elektronenmikroskopische Untersuchungen am gesunden und kariösen Dentin mit Hilfe der Abdruckmethode und der Schnittmethode an kompakter nicht entmineralisierter Substanz
Zeitschr. f. Zellforsch. 33, 192 (1961)

31. HÖHLING, H.J.; R.ERWIG
Licht- und elektronenmikroskopische Untersuchungen am
kompakten, nicht vorbehandelten Zahnschmelz.
DZZ 15, H 17, 1193 (1960)
32. JASUZUMI, O.
Electron microscopy of human dentin.
J.Dent.Res.6, 808 (1955)
33. JOHANSEN, E.; F.PACKS
Electron microscopic observation on the three dimensional
morphology of apatite crystallites of human dentin and bone.
J.Biophys.Biochem.Cytol.7, 743 (1960)
34. KATO, SCHIN-ISCHI; T.SAKUMA; J.TAMURA
Electron microscopic observations on dentinal tubules of hu-
man teeth.
Okajimas Folia anat.jap.28, 611 (1956)
35. KECK, J. zit. nach HELMCKE, J.G.
36. KEIL, A. Anatomie und Pathologie der Zahnhartsubstanz im Lichte
neuerer mikroskopischer Forschungsergebnisse.
Dtsch.Z.M.K.25, 177 (1956)
37. KENNEDY, J.J.; G.W.TEUSCHER; L.S.FOSDICK
The ultramicroscopic structure of enamel and dentin.
J.Amer.Dent.Ass.46, 423 (1953)
38. KOHÁRI, St.; K.BÓNA
Vergleichende elektronenmikroskopische Untersuchungen von
Zahnschmelz und Dentin bei Individuen verschiedenen Alters.
DZZ 15, 14, 1009 (1960)
39. Beiträge zur Mikrostruktur der Schmelzprismen.
DZZ 16, 9, 641 (1961)
40. KÖNIG zit. nach J.G.HELMCKE und E.MENKE
41. LENZ, H. Elektronenmikroskopische Untersuchungen über Strukturen des
normalen Dentins und deren Veränderungen durch Kariesein-
wirkung.
Med.Diss. Berlin (1955)
42. Elektronenmikroskopische Untersuchungen am normalen Schmelz
DZZ 11, 23, 1371 (1956)

43. LENZ, H. Elektronenmikroskopische Untersuchungen an der Ameloblastenschicht.
DZZ 12, 22, 1568 (1957)
44. Elektronenmikroskopische Untersuchungen der Schmelzgenese
DZZ 17, 991 (1958)
45. Elektronenmikroskopische Untersuchungen der Matrix des Schmelzes und des Dentins.
Mikroskopie 13, 85 (1958)
46. Bestehen zwischen Schmelz und Dentin präformative Bahnen? Elektronenmikroskopische Untersuchungen.
DZZ 14, 13, 272 (1959)
47. Recherches au microscope électronique sur la structure de l'émail et spécialement sur les buissons et la cuticule.
Bull.internat.rech.sc.stomat.4, 2-3, 199 (1961)
48. Elektronenmikroskopische Untersuchungen der Mineralisation des Zahnschmelzes und der beginnenden Schmelzkaries.
Arch.Oral.Biol.4, 34 (1961)
49. Electron microscope studies on human dental enamel.
J.Roy.Microsc.Soc.78, 431 (1958)
50. MENKE, E. Verbesserte elektronenmikroskopische Untersuchungen an der menschlichen Zahnhartsubstanz.
Med.Diss. Göttingen (1949)
51. Elektronenmikroskopie an der menschlichen Zahnhartsubstanz.
Z.Anat.115, 1-18 (1950)
52. MEYER, W. Normale Histologie.
Ersch.b. Carl Hanser Verlag München (1951)
53. NECKEL, J. Elektronenmikroskopische und chemische Untersuchungen über die isolierbaren Teile der Odontoblastenfortsätze menschlicher Zähne
DZZ 11, 485 (1956)
54. ORBAN, B. zit. nach S.BERNICK

55. PETER, J. Elektronenmikroskopische Darstellung von Faserstrukturen im Dentin.
Schweiz.Mschr.Zahnheilkunde 69, 8, 680 (1959)
56. PLAČKOVÁ; J. PŘIBYL und J. ŠTĚPÁNEK
Eine elektronenmikroskopische Studie der Dentinstruktur.
DZZ 14, 1010 (1959)
57. RICHARDS, A.G.; L.THOMASSEN
Microstructure of tooth surfaces as revealed by the electron microscope.
J.Am.Dent.Ass.31, 772 (1944)
58. ROUILLER, Ch.L.
La gaine de Neumann.
Med.Diss. Genf (1951)
59. ROUILLER, Ch.L.; L.HUBER; E.RUTISHAUSEN
La structure de la dentine, étude comparée de l'os et de l'ivoire au microscope électronique.
Acta anat.Basel 16, 16 (1952)
60. SCOTT, D.B.; R.W.G.WYCKOFF
Electron microscopy of tooth structure by the shadowed collodion replica method.
Publ.Health.Rep.Wash.62, 1513 (1947)
61. Electron microscopy of human dentin.
J.Dent.Res.29, 556 (1950)
62. The study of enamel by electron microscopy.
J.Amer.Dent.Ass.44, 615 (1952)
63. SCOTT, D.B.; S.TAKUMA
Electron microscopy of developing and mature calcified tissues.
J.Dent.Belge 2, 189 (1951)
64. SCOTT, D.B.; M.J.USSING; R.F.SOGNNAES; R.W.G.WYCKOFF
Electron microscopy of mature human enamel
J.Dent.Res.31, 1, 74 (1952)
65. SCHROFF, F.R.; K.J.WILLIAMSON; W.J.BERTAUD; D.M.HALL
Further electron microscope studies of dentine. The nature of the odontoblastprocess.
Oral.Surg.Med.a.Path.9, 356 (1956)

66. SYRRIST, A. En orientering in elektronmikroskopie med neon resultater fra histologiske underskelser av elmalje og dentin.
Odont.Tskr.Göteborg 57, 79 (1949)
67. SYRRIST, A.; G.GUSTAFSON
A contribution to the technique of the electron microscopy of dentin.
Odont.Tskr.Göteborg 59, 500 (1951)
68. TAKUMA, S. Electronmicroscopy of the strucutre around the dentinal tubule.
J.Dent.Res.39, 5, 973 (1960)

IX. LEBENSLAUF

Am 4. Januar 1939 wurde ich als Sohn des Zahnarztes Dr. Erich Litsch und seiner Ehefrau Erna Litsch, geb. Marschall in Stuttgart geboren.

Von 1945 bis 1949 besuchte ich dort die Volksschule und trat anschliessend in die Freie Waldorfschule über. 1958 legte ich daselbst die Reifeprüfung ab.

Im Mai 1958 begann ich mit dem Studium der Zahnheilkunde an der Universität in München, wo ich im Herbst 1963 mein Studium mit dem zahnärztlichen Staatsexamen abschloss. Nach einer halbjährigen Assistentenzeit bei einem prakt. Zahnarzt in München, wurde ich mit den Aufgaben eines Verwalters eines wissenschaftlichen Assistenten an der konservierenden Abteilung der Universitätszahnklinik München am 15. August 1964 betraut.

